



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA CIVIL**

PROYECTO FIN DE MÁSTER

“PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS”

EMPLEO DE FRP EN ESTRUCTURAS

Autor: Mónica Nitoiu Soto

Tutor/es: María Dolores Gómez Pulido

Fecha: 2018

A mis padres, a mis hermanas y a mis amigos, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante la etapa académica.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a M. Dolores G. Pulido, directora de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido del mismo.

Quisiera agradecer a la Universidad Politécnica de Madrid por haber permitido formarme en ella. A todas las personas que fueron partícipes en este trabajo, ya sea de manera directa o indirecta, realizando un pequeño aporte, que en el día de hoy se verá reflejado en la culminación de mi paso por la universidad. Gracias a todas las personas que se ha cruzado en mi camino a lo largo del máster y que me han aportado algo valioso.

Un especial reconocimiento lo merecen mis padres, mis hermanas y amigos que han sido mis mayores apoyos y motivadores cada día para continuar la elaboración de este proyecto sin tirar la toalla.

Este es un momento muy especial que espero que perdure en el tiempo, no solo en las mentes de las personas a quienes agradecí, sino también a quienes invirtieron su tiempo para echar una mirada mi proyecto, a ellos mismo se lo agradezco con todo mi corazón.

RESUMEN

Los materiales compuestos reforzados con fibras poliméricas (FRP, *Fiber Reinforced Polymers*) cada vez se emplean con mayor frecuencia en la construcción. Esto se debe a las propiedades físicas y químicas de estos sistemas que aportan grandes beneficios a las estructuras, un bajo peso, resistencia a la corrosión, mínimo coste de mantenimiento, entre otros.

El refuerzo de estructuras es una de las principales aplicaciones en la industria. Progresivamente, se ha ido incorporando a la construcción de puentes los materiales compuestos, como las estructuras híbridas de FRP con madera, hormigón o acero. Sin embargo, la falta de normativa en el diseño de los FRP hace que la fabricación de nuevas estructuras formadas íntegramente por estos materiales compuestos, sea muy limitada.

Este trabajo describe el empleo de materiales reforzados con fibras poliméricas, FRP, en estructuras, centrándose en la durabilidad y sostenibilidad de los materiales empleados.

ABSTRACT

Advanced composite materials (Fiber Reinforced Polymers), FRP, are very used in structures, buildings and bridges. This is because to the physical and chemical properties of these systems that contribute great benefits to structures, a low weight, resistance to the corrosion, minimal cost of maintenance, among others.

Strengthening of structures is one of the main applications in the construction industry. FRP have been progressively incorporated into the bridge industry, such as FRP's hybrid structures with wood, concrete or steel. Nevertheless, the lack of standards in the design of the FRP causes that its use will not spread all it should be taking into account their advantages.

This work describes the use of FRP materials in structures, with a particular focus on sustainability and durability.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	METODOLOGÍA.....	4
2.1.	BASES DE DISEÑO DE REFUERZOS FRP A FLEXIÓN	5
2.1.1.	Pérdida de acción compuesta	6
2.2.	ANÁLISIS DEL ESTADO LÍMITE DE REFUERZO FRP A FLEXIÓN	7
2.2.1.	Acción compuesta completa.....	8
2.2.2.	Pérdida de acción compuesta.....	8
2.3.	ANÁLISIS EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE CORTANTE	10
3.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	11
3.1.	DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO	11
3.2.	FUNCIONES DE LOS COMPONENTES MATERIAL COMPUESTO	13
3.3.	PROPIEDADES DE UN MATERIAL COMPUESTO	15
3.4.	CLASIFICACIÓN MATERIALES COMPUESTOS	16
3.4.1.	Materiales compuestos de matriz metálica (MMC)	16
3.4.2.	Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC).....	18
3.4.3.	Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC)	18
3.5.	FIBER REINFORCED POLYMER (FRP)	21
3.6.	MATRICES	22
3.7.	FIBRAS.....	27
3.7.2.	Fibras de vidrio.....	28
3.7.2.	Fibras de carbono.....	29
3.7.3.	Fibras de aramida.....	29



3.8.	IMPORTANCIA DE LA INTERFAZ.....	31
3.8.1.	Interacción por humectación.....	34
3.8.2.	Interdifusión	34
3.8.3.	Atracción electrostática.....	34
3.8.4.	Enlace químico.....	34
3.8.5.	Adhesión mecánica.....	35
3.9.	FORMATOS DE FRP PARA REFUERZOS DE ESTRUCTURAS.....	34
3.9.1	Sistemas para molde manual en húmedo (wet layup).....	35
3.9.2.	Sistemas preimpregnados.....	35
3.9.3.	Sistemas prefabricados o precurados.....	36
3.9.4.	Sistemas insertados en el recubrimiento.....	37
3.10.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA REHABILITACIÓN Y REFUERZO.....	36
3.11.	SITUACIÓN DEL FRP	41
3.12.	VENTAJAS E INCOVENIENTES	60
4.	RESULTADOS Y DISCURSIÓN.....	62
4.1.	ASPECTOS ECONÓMICOS	68
4.4.	ASPECTOS AMBIENTALES	68
4.4.	RECICLAJE	68
5.	CONCLUSIONES.....	73
6.	BIBLIOGRAFÍA	74



1. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo XX se produjo un ritmo acelerado del desarrollo de las infraestructuras a consecuencia de los requerimientos de la sociedad. Esto fue posible gracias a los avances en la ciencia y en la tecnología que permitió el empleo de distintas técnicas en el sector de la construcción. Estas estructuras, elaboradas principalmente con hormigón y acero, materiales más empleados en el mundo de la ingeniería civil, se encuentran expuestas a procesos de corrosión y a las condiciones medioambientales, produciendo el deterioro o envejecimiento de las mismas. En algunos casos surgen problemas de durabilidad que afectan a la estabilidad de las construcciones, y en otras situaciones, es posible que se manifieste en un futuro próximo. Estos inconvenientes han hecho que estos últimos años se tenga en cuenta las fases de rehabilitación, mantenimiento y protección, prestando atención a la seguridad de la estructura así como a su economía y su estética. Asimismo, han surgido otros planes en los que se tiene en cuenta la sostenibilidad y el medio ambiente.

La realización de estas actividades se tiene que intentar desarrollar sin producir ninguna interrupción en el servicio de la estructura. Es imprescindible estimar la complejidad de las operaciones y el impacto de las acciones en el entorno. Ante esta situación, se ha producido un cambio de mentalidad y se buscan elaborar estructuras que sean duraderas con las mínimas operaciones de mantenimiento.

El empleo de materiales compuestos en estructuras presenta importantes ventajas desde el punto de vista medio ambiental y económico. Estas ventajas se deben a su bajo peso, que facilita el transporte, el manejo y la puesta en obra. Se pueden adaptar a la geometría de los elementos estructurales, presentan resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, etc. Estos materiales se han convertido en una alternativa frente los empleados convencionalmente.

La aplicación de estos elementos en estructuras en general y en puentes en particular ha adquirido gran importancia por las características que exhiben. Dentro de los materiales compuestos, los laminados y tejidos FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) son los que más se han empleado para el refuerzo de vigas de hormigón en estados de carga a flexión, seguido por el de confinamiento y después el cortante. Investigaciones elaboradas en Suiza por el laboratorio EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), hicieron que a finales de 1980 se emplearan estos materiales en el refuerzo de vigas. Estos estudios tuvieron un gran impacto en países como Estados Unidos, Canadá, Italia, Suecia, Grecia, China y Japón, en los cuales realizaron sus propias investigaciones.

Las primeras líneas de estudio se basaron en emplear métodos analíticos previamente elaborados para la unión con acero, y se comprobó que estas uniones con FRP funcionan correctamente en estado a flexión. En ensayos a cortante y a confinamiento, estos materiales no presentan ese comportamiento tan bueno.

Ante esta situación se realizaron nuevos estudios experimentales con probetas reforzadas de FRP y algunos analíticos, verificando que estos materiales son capaces de elevar la resistencia a compresión de la estructura de tipo hormigón.

Actualmente se están elaborando diferentes estudios empíricos, cuya calibración se basa un número limitado de resultados, en probetas de forma cilíndrica con hormigones de resistencia comprendida entre 30 MPa y 50 MPa. Estos prototipos se han incorporado en publicaciones en varios países como sugerencias de cálculo. Determinados estudios que intentan contrastar estos modelos con otros resultados presentes en la literatura, indican que hay dispersión de datos y la compresión axial aun es difícil de pronosticar.

1.1. OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo es la elaboración de un estudio acerca del empleo de FRP en tableros de puentes, con especial interés en el campo de la rehabilitación y refuerzo de estructuras de tipo puente.

2. METODOLOGÍA

Las formas de fallo más común en las estructuras de hormigón reforzadas con materiales compuestos están relacionadas con las deficiencias de los hormigones, debido a que estos materiales presentan una mala resistencia a tracción y a cortante en la zona de contacto con la resina.

A continuación se estudiarán las bases de diseño y modos de rotura de este tipo de refuerzos.

2.1. BASES DE DISEÑO DE REFUERZOS FRP A FLEXIÓN

Los refuerzos de FRP en las estructuras de hormigón se tienen que situar de forma paralela a la dirección de tracción. La aportación del refuerzo FRP de forma externa y el buen comportamiento estructural entre el hormigón y el material reforzante, Figura 1.

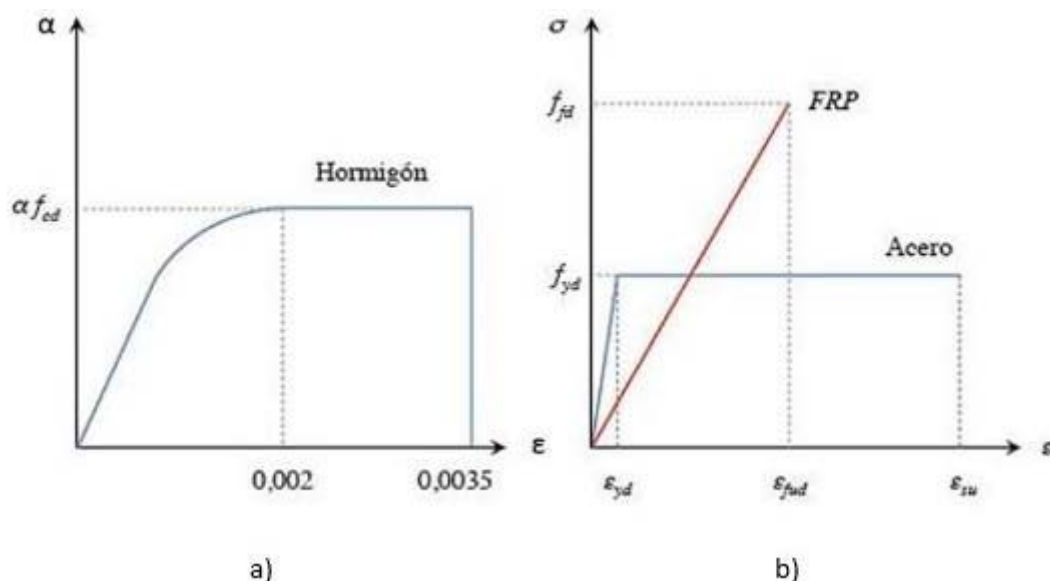


Figura 11. Finalidad de un material compuesto y sus componentes: matriz y refuerzo (Pérez, M.A. (2006))

Las bases para un estudio del estado límite a flexión de las estructuras. La curva tensión-deformación del acero, hormigón y del FRP. Se considera que no hay un deslizamiento entre el FRP y el hormigón (adherencia perfecta). Al tener adhesivos con espesores comprendidos entre 1 y 1,5 milímetros, se pueden ignorar los procesos viscoelásticos como la fluencia de corte axial e interlaminar, la relajación.

Los elementos reforzados, al colapsar, pueden hacerlo encontrándose en alguno de los dos siguientes estados:

- **Acción compuesta completa.** En este estado ambos materiales (hormigón y refuerzo) trabajan de forma conjunta. El fallo se produce bien por excesiva deformación a compresión del hormigón, por excesiva deformación a tracción del refuerzo o por excesiva deformación a tracción de la armadura de acero.
- **Pérdida de acción compuesta.** Ocurre en situaciones en las que se produce un deterioro en la acción compuesta previamente al colapso de los materiales constituyentes, como el despegue del refuerzo.

Los modos de rotura, en el caso de acción compuesta, suelen ser de tres tipos:

a) Plastificación del acero con aplastamiento del hormigón. La máxima resistencia en estado a flexión se produce cuando el hormigón alcanza la máxima deformación por compresión, estando la armadura de acero a tracción plastificada y FRP no ha alcanzado su deformación a tracción de rotura.

b) Plastificación del acero con rotura a tracción del FRP. El colapso de la sección se produce estando plastificada la armadura de acero a tracción y alcanzado la deformación límite a tracción el refuerzo FRP.

c) Aplastamiento del hormigón. Se trata de un estado frágil e indeseable, ya que se alcanzan estados elevados de carga donde el hormigón sufre aplastamiento por los esfuerzos a compresión antes de que el acero entre en la zona plástica o se produzca la rotura del FRP.

2.1.1. Pérdida de acción compuesta

La adherencia entre el hormigón y el refuerzo ha de ser la suficiente para la transferencia de esfuerzos. Se pueden producir defectos en la adherencia de forma localizada aunque no se considera una forma de fallo. Ahora bien, en el caso de que se propague ese defecto, la acción compuesta se pierde con lo que la sección no tiene capacidad para soportar esfuerzos elevados. Este fenómeno se le llama *peeling-off* en la literatura inglesa y desprendimiento o despegue en la castellana. En situaciones donde los esfuerzos no se puedan distribuir de manera homogénea, puede producirse un colapso frágil, súbito.

Los fallos que suelen producirse son:

a) Fallo intersticial. En la Figura 2 se muestran los distintos despegues que se pueden producir en diferentes zonas de contacto entre el hormigón y el FRP.

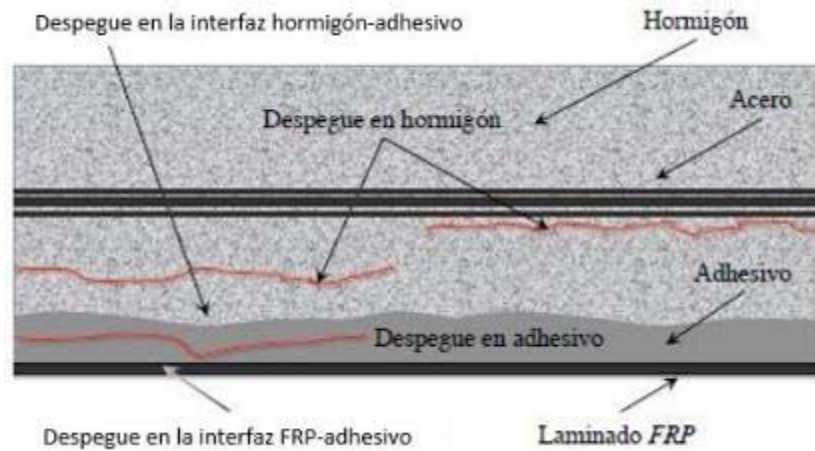


Figura 1. Modos de fallo por pérdida de adhesión entre el hormigón y el FRP (Pérez, M.A. (2006))

- **Despegue hormigón próximo a la superficie.** En general, el adhesivo suele presentar una mayor resistencia a tracción y a cortante que la del hormigón. En este material sucederá el fallo y una pequeña cantidad de hormigón quedará unida al refuerzo tras el despegue.
- **Despegue interfaces entre hormigón y adhesivo o entre adhesivo y FRP.** Se suelen dar en casos en los que la superficie de los materiales no está acondicionada para el suministro del refuerzo. La resistencia de la resina tiene que ser mayor que la de adhesión.
- **Pérdida adherencia en el FRP (fallo interlaminar a cortante).** Puede ocasionarse en casos en los que no hay una unión entre las fibras y la resina. La propagación de grietas es más común en la zona de refuerzo que en los hormigones. Normalmente se trata de un mecanismo de fallo secundario, ya que se produce una vez iniciado la rotura adhesiva en el hormigón.

2.2. ANÁLISIS DEL ESTADO LÍMITE DE REFUERZO FRP A FLEXIÓN

Conocidos las formas de rotura en estado a flexión del material, el siguiente paso es el diseño de los laminados. El refuerzo dispuesto con una orientación longitudinal proporcionará al material una elevada resistencia a flexión. La carga requerida para la tensión de flexión de diseño sobrepasa el valor del momento calculado con los factores requeridos del ACI 318-05 [1].

2.2.1. Acción compuesta completa:

a) Plastificación del acero seguido del aplastamiento del hormigón

Este método se diseña bajo las condiciones de diseño que presenta el hormigón, donde el refuerzo se puede considerar como una armadura añadida. Para conocer el momento de diseño, se utiliza ecuación de equilibrio, considerando las cargas iniciales.

b) Plastificación del acero seguido de una fractura del FRP

Normalmente, el refuerzo se despegue y esto conlleva la rotura del FRP. Lo ideal sería que ambos materiales en condiciones de trabajo pudiesen alcanzar sus estados máximos sin que se ocasionen dichos defectos.

2.2.2. Pérdida de acción compuesta

La separación del laminado en la estructura a reforzar puede ser originada por varias razones:

a) Despegue causado por fisuras cortantes

Las grietas en el hormigón suelen presentar una cierta inclinación. Se crean tensiones en la zona de contacto entre la armadura de acero y el FRP, a consecuencia de que la fisura se ensancha de manera horizontal.

La separación de los materiales dependerá de la resistencia del hormigón, de la resistencia a flexión y a cortante del refuerzo y del movimiento en sentido vertical de la abertura de la grieta.

b) Despegue en la zona de anclaje y fisuras de flexión

En este caso se realizan en función de varios criterios:

- **Verificación del anclaje final. Limitación de la tensión del FRP.** Este caso implica dos pasos. Una de ellas es la verificación de que el anclaje es producto de las cargas cortantes, empleado la ley de desplazamiento en la zona de contacto del FRP y del hormigón. Ante esta situación, se tiene que limitar los esfuerzos en el refuerzo de forma que no se produzca una rotura precoz del adhesivo. Este método se ha empleado en varios diseños porque simplifica el comportamiento real. Sin embargo, la rotura del FRP no es un valor fijo, ya que depende de varias

variables (distribución de las fisuras, relación momento y carga cortante, tensión en el material, etc.).

- **Verificación del anclaje final y la transferencia de fuerza FRP-hormigón.** Al igual que en caso anterior se siguen dos etapas. Verificación de las cargas cortantes en el anclaje y ésta carga en la zona de la interfaz, tiene que ser inferior al estado crítico. Esta técnica presenta el inconveniente de que se emplea el mismo mecanismo de despegue para las áreas cercanas al anclaje y la central del FRP. Otra desventaja es la suposición de que las cargas se encuentran distribuidas en un material homogéneo sin grietas. A pesar de ello, esta aproximación hace posible que se pueda aplicar en situaciones reales.
- **Verificación de acuerdo con la línea envolvente de las tensiones en el FRP.** Se basa en la unión del anclaje final y cualquier zona de contacto entre el hormigón y el refuerzo. Para ello se aplica la ley de deslizamiento y la envolvente de las tensiones del refuerzo. Esto permite emplear el mismo modelo para la desunión y las hendiduras de flexión. El grado de dificultad es su aplicación práctica en el sector de la ingeniería.

c) Fallo final cortante

Se realiza una simulación del comportamiento de la viga en estado cortante (Figura 6). Este método es una simplificación aproximada basado en el cálculo analítico de los esfuerzos normales y tangenciales del refuerzo.

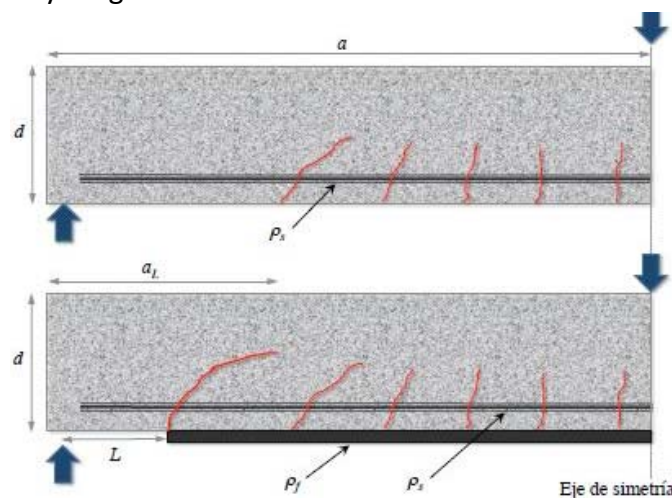


Figura 2. Simulación estado cortante en viga de hormigón y su extensión para el refuerzo FRP (Pérez, M.A. (2006))

d) Despegue causado por defectos en la superficie del hormigón

Este defecto se ha estudiado con profundidad. No obstante, es posible evitarlo si se condiciona la superficie del hormigón de manera que la rugosidad esté limitada. En la Figura 7 se pueden observar las tensiones que se producen en el material por las imperfecciones del hormigón [21,23].



Figura 3. Tensiones ocasionadas por los defectos superficiales (Pérez, M.A. (2006))

2.3. ANÁLISIS EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE CORTANTE

En este caso es importante que las fibras se ubiquen de manera perpendicular a la tracción para poder así “coserla”, ya que el refuerzo trabaja con su máxima eficiencia. Sin embargo, la forma más habitual de colocar los FRP es en sentido perpendicular al eje longitudinal de la estructura (Figura 8).



Figura 4. Laminados para el refuerzo en estado cortante (Pérez, M.A. (2006))

La manera más usual de colocar estos refuerzos es de manera *in situ* para secciones de tipo “U” o encamisado completo, y un pegado de manera lateral de laminados de FRP para los estribos.

La opción más eficaz es el encamisado completo aunque su aplicación es compleja y más aún lo son los laminados. Esto se debe a que estos materiales preconformados no tienen la capacidad para doblarse y no se pueden acondicionar a las secciones. De manera que

la opción que se emplea es el pegado de los laminados en las caras laterales del material sin que haya unión entre ambos elementos. La adherencia es menor en el caso de los laminados que en las secciones en “U” y los encamisados, por lo que son más propensos al fallo.

La aportación del refuerzo es complicado de cuantificar, esto hace que sea complicado una análisis detallado de los mecanismos de rotura. Estos experimentos han demostrado que el defecto se ocasiona en los casos de pegado lateral por desprendimiento.

3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1. DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

Se trata de un sistema formado por la unión de distintos constituyentes obteniendo un material con unas funcionalidades superiores a las que presentan los componentes por separado. Los elementos que conforman este sistema presentan unas características químicas distintas y están distanciados por una interfaz. Para que sea posible su separación tanto física como químicamente, los componentes tienen que presentar discontinuidad química permitiendo así su distinción. Esto permite la producción de estructuras con características que no presentan los materiales monolíticos.

En general estos materiales constan de una matriz a la cual se le introduce una serie de aditivos que mejoren así sus propiedades. Por tanto, la matriz es la fase continua que se encuentra alrededor el otro componente y la fibra, el refuerzo, se muestra de forma dispersa en la matriz. La interacción entre estas fases es debido a la interfaz (Figura 9).

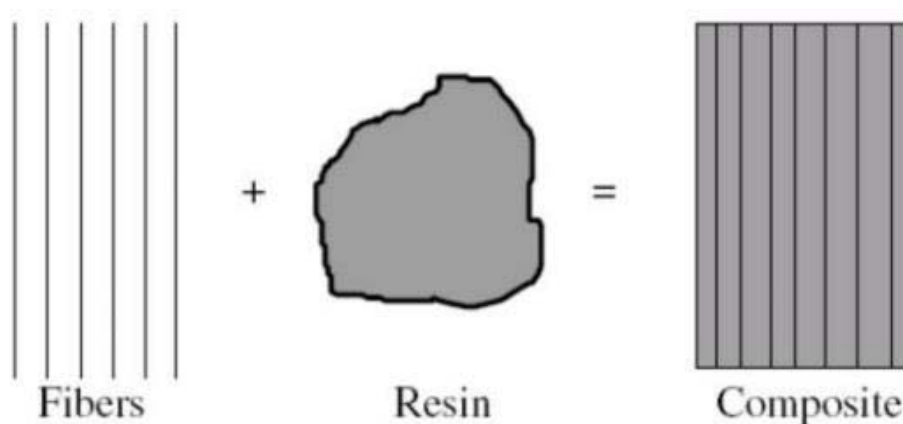


Figura 9. Formación de un material compuesto usando resina y fibras (Pérez, M.A. (2006))

Los requisitos que debe cumplir un material compuesto son los siguientes:

- Las características de la matriz y del refuerzo deben ser distintas y a su vez diferentes del material compuesto que formarán.
- Los materiales polifásicos que presentan una combinación de fases por medio de un tratamiento térmico (aleaciones metálicas), no son materiales compuestos

Las características de estos materiales se caracterizan por la interfaz que presentan y las propiedades de los constituyentes. Además, los componentes no se tienen que fusionar en la fase del otro elemento, y tiene que ser posible la identificación de cada una de las fases mediante técnicas de caracterización como el empleo de la microscopía electrónica de transmisión (TEM) o de barrido (SEM).

La Figura 10 muestra cómo en las últimas décadas los materiales compuestos han ido cobrando importancia siendo los más importantes los sistemas de matriz polimérica con fibras. Este crecimiento seguirá progresando según las predicciones al igual que los compuestos de matriz cerámica y metálica [21].

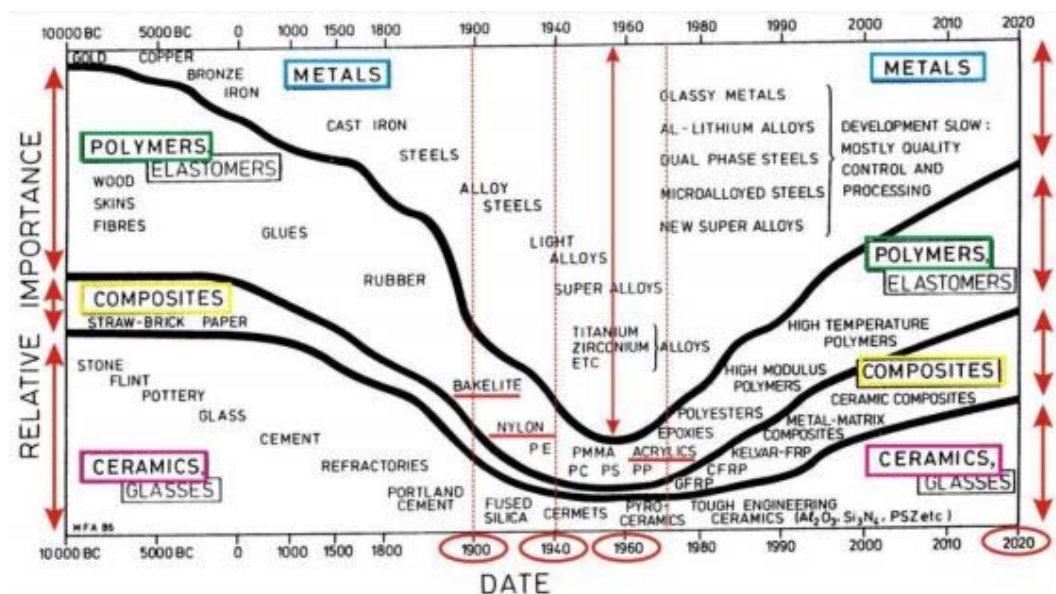


Figura 10. Importancia relativa de los cuatro tipos de materiales en la ingeniería civil y mecánica en función del tiempo (Pérez, M.A. (2006))

3.2. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES MATERIAL COMPUESTO

En un material compuesto las fibras actúan como elemento reforzante de la matriz. Para que las fibras cumplan su función deben presentar las siguientes características:

- Alta resistencia mecánica a tracción
- Rigidez mecánica elevada
- Alta ligereza
- Capacidad de adaptarse a distintas formas en los distintos procesos industriales
- Variedad de longitud

La comparación de las propiedades mecánicas de las fibras se ilustra en la Tabla 1.

La matriz actúa como un aglutinante y permite la transferencia a las fibras de esfuerzos externos suministrados al sistema. Por tanto, la matriz debe presentar ductilidad y las fibras, mayor módulo elástico.

Otra de las funciones de la matriz, es que sirven como protección de las fibras de defectos mecánicos o químicos causados por el medio ambiente. Además, obstaculiza el movimiento de fisuras de una fibra a otra, evitando así problemas posteriores.

La rotura individual de las fibras no causa la fractura total del material, para que se produzca este fallo, tendrá que romperse una cantidad elevada de fibras próximas entre sí. Una elevada unión fibra-matriz es primordial para que haya una buena transmisión de esfuerzos de la matriz a la fibra y se reduzca el arrancado de fibras. Por tanto, a la hora de seleccionar un material compuesto es importante que la resistencia de dicha adherencia sea alta. La Figura 11 indica el propósito final de un material compuesto y sus constituyentes [21].

MATERIALES COMPUESTOS

- La finalidad de un MATERIAL COMPUESTO es COMBINAR las CARACTERÍSTICAS del ELEMENTO DE REFUERZO y del POLÍMERO TERMOESTABLE.

MATRIZ PLÁSTICA

- Facilita el PROCESADO de la estructura del MATERIAL COMPUESTO.
- Al endurecer PERMITE MANTENER LA FORMA de la pieza del COMPOSITE.
- Una vez ENDURECIDA, mantiene las FIBRAS DE REFUERZO PERFECTAMENTE ALINEADAS.
- PROTEGE las FIBRAS frente la acción DE AGENTES EXTERNOS.

ELEMENTO DE REFUERZO

- Actúa como ELEMENTO RESISTENTE y se encarga de SOPORTAR EL ESFUERZO MECÁNICO.

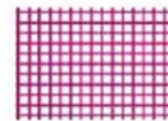


Figura 11. Finalidad de un material compuesto y sus componentes: matriz y refuerzo (Pérez, M.A. (2006))

Tabla 1. Comparación de las propiedades mecánicas de las fibras y sus materiales monolíticos equivalentes (Pérez, M.A. (2006))

	Young's modulus (GPa)	Strength ^a (MPa)
Alumina: fibre (Saffil RF)	300	2000
monolithic	382	332
Carbon: fibre (IM)	290	3100
monolithic	10	20
Glass: fibre (E)	76	1700
monolithic	76	100
Polyethylene: fibre (S 1000)	172	2964
monolithic (HD)	0.4	26
Silicon carbide: fibre (MF)	406	3920
monolithic	410	500

^atensile and flexural strengths for fibre and monolithic respectively.

3.3. PROPIEDADES DE UN MATERIAL COMPUESTO

Las características, la proporción y la geometría de los elementos constituyentes en un material compuesto, condicionan las propiedades finales del conjunto. En la Figura 12 se encuentran representadas dichas características. Las propiedades de los materiales compuestos son:

- Poco peso, facilitando el transporte y su montaje
- Elevada resistencia a la corrosión, agentes químicos y medioambientales
- Buen comportamiento a fatiga
- Resistencia térmica
- Aislamiento térmico, eléctrico y acústico
- Baja transmisión de vibraciones
- Estabilidad dimensional y libertad de diseño
- Mejorar las propiedades tribológicas
- Muy importante su reciclaje

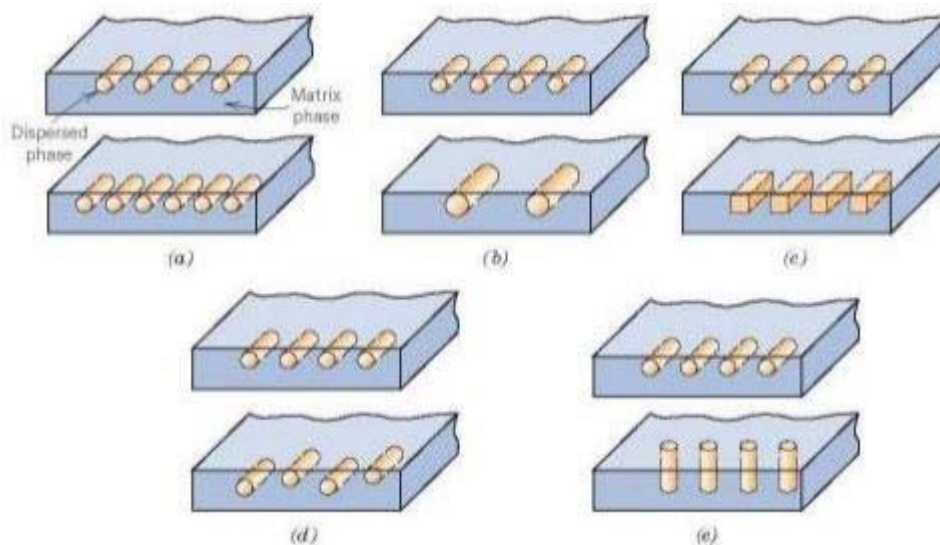


Figura 12. Representación esquemática de varias características geométricas y espaciales de partículas de fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación (Pérez, M.A. (2006))

En la Tabla 2 aparecen las propiedades generales de los materiales de tipo metálico, cerámico, polimérico y compuestos [21].

Tabla 2. *Propiedades generales de los diferentes tipos de materiales (Pérez, M.A (2006))*

Materiales	Puntos fuertes	Debilidades
Metales	<ul style="list-style-type: none"> Rigidez ($E \approx 100$ GPa) Ductilidad \Rightarrow Moldeabilidad Tenacidad ($K_{IC} > 50$ MPa m^{1/2}) Elevado punto de fusión ($T_m \approx 1.000$ °C) Elevada resistencia al choque térmico ($\Delta T \approx 500$ °C) Elevadas conductividades eléctricas y térmicas 	<ul style="list-style-type: none"> Se deforman plásticamente ($\sigma_f \sim 1$ MPa) \Rightarrow Aleaciones Baja dureza ($H \sim 3\sigma_f$) \Rightarrow Aleaciones Baja resistencia a la fatiga ($\sigma_e \sim 1/2\sigma_f$) Débil resistencia a la corrosión \Rightarrow recubrimientos
Cerámicas	<ul style="list-style-type: none"> Rigidez ($E \approx 200$ GPa) Elevada resistencia a la fluencia y duras ($\sigma_f \approx 3$ GPa) Alto punto de fusión ($T_m \approx 2.000$ °C) Densidad moderada Resistencia a la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> Muy baja tenacidad ($K_{IC} \approx 2$ MPa m^{1/2}) Débil resistencia al choque térmico ($\Delta T \approx 200$ °C) Dificultad de moldeo \Rightarrow métodos de polvo
Polímeros	<ul style="list-style-type: none"> Ductilidad y moldeabilidad Resistencia a la corrosión Baja densidad Bajas conductividades eléctricas y térmicas 	<ul style="list-style-type: none"> Baja rigidez ($E \approx 2$ GPa) Elevada fluencia ($\sigma_f \approx 2-100$ MPa) Baja temperatura de transición vítrea ($T_g \approx 100$ °C) \Rightarrow fluyen a baja temperatura Tenacidad media ($K_{IC} \approx 1$ MPa m^{1/2})
Materiales compuestos	<ul style="list-style-type: none"> Rigidez ($E > 50$ GPa) Resistencia mecánica ($\sigma_f \approx 200$ MPa) Tenacidad ($K_{IC} > 50$ MPa m^{1/2}) Resistencia a la fatiga Resistencia a la corrosión Baja densidad 	<ul style="list-style-type: none"> Dificultad de moldeo Elevado coste Alta fluencia (matrices poliméricas)

3.4. CLASIFICACIÓN MATERIALES COMPUESTOS

3.4.1. *Materiales compuestos de matriz metálica (MMC)*

Los compuestos de matriz metálica se desarrollan para mejorar las propiedades mecánicas y su comportamiento a altas temperaturas de las aleaciones metálicas. Estas propiedades varían en función del tipo de refuerzo que presenten los materiales compuestos. Además, hay que tener en cuenta que el aumento de la resistencia en estos materiales produce una reducción de la tenacidad.

La fase continua de estos materiales suele ser un metal o una aleación con fibras de alta resistencia y rigidez, whiskers (fibras cortas) o partículas. Los materiales más utilizados en matrices son aluminio, magnesio, titanio y sus aleaciones, mientras que las fibras son de grafito o cerámicas. En estos materiales, como ocurren con otros tipos de compuestos, es importante la selección tanto de una matriz como de los refuerzos adecuados para satisfacer las necesidades requeridas. Se tiene que tener en cuenta que en los compuestos de matriz metálica se pueden diseñar sus propiedades de forma isotrópica a diferencia de los convencionales que son anisotrópicos. En la Tabla 3 se muestran las propiedades de los distintos materiales empleados en matrices y en la Tabla 4 las propiedades de los refuerzos [21].

Tabla 3. Propiedades de los materiales compuestos de matriz metálica (Pérez, M.A (2006))

	Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Ductility (%)
Al-Cu-Mg (2618A)	74	416	430	2.5
Al-Cu-Mg + 20%Al ₂ O ₃	90		383	0.8
Al-Zn-Mg	~ 70		273	11.5
Al-Zn-Mg + 25%Al ₂ O ₃	80 +		266	1.5
Titanium (wrought)	120	200	400	25
Titanium + 35%SiC	213		1723	< 1
Ti-Al-V (wrought)	115	830	1000	8
Ti-Al-V + 35%SiC	190		1434	0.9

Tabla 4. Propiedades de las partículas como refuerzo en materiales compuestos de matriz metálica (Pérez, M.A (2006))

Type of Particle	SiC	Al ₂ O ₃	AlN	B ₄ C	TiB ₂	TiC	BN
Type of Crystal	hex.	hex.	hex.	rhomb.	hex.	cub.	hex.
Melting point [°C]	2300	2050	2300	2450	2900	3140	3000
Young's modulus [GPa]	480	410	350	450	370	320	90
Density [g cm ⁻³]	3.21	3.9	3.25	2.52	4.5	4.93	2.25
Heat conductivity [W m ⁻¹ K ⁻¹]	59	25	10	29	27	29	25
Mohs-hardness	9.7	6.5		9.5			1.0-2.0
Thermal coefficient of expansion [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4.7-5.0	8.3	6.0	5.0-6.0	7.4	7.4	3.8
Producer	Wacker Ceramics Kempten, Electro Abrasive, H. C. Starck	Wacker Ceramics Kempten	H. C. Starck	Wacker Ceramics Kempten, Electro Abrasive, H. C. Starck	H. C. Starck	H. C. Starck	Wacker Ceramics Kempten, H. C. Starck

3.4.2. *Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC)*

Los materiales cerámicos son la única opción para aplicaciones estructurales de alta temperatura (superiores a los 1100 °C) pero se ven perjudicados por la fragilidad que presentan. De esta manera, los CMCs se desarrollaron para mejorar la tenacidad, reduciendo la susceptibilidad de los defectos y mejorando su fiabilidad bajo la influencia de tensiones mecánicas. El parámetro que mide la tenacidad es el factor de tensiones crítico K_{IC} , a mayor tenacidad mayor valor K_{IC} . En la Tabla 5 se compara la tenacidad de los distintos materiales [21].

Tabla 5. *Propiedades de los compuestos de matriz cerámica (Pérez, M.A. (2014))*

	Young's modulus (GPa)	Strength (MPa)	Toughness K_{IC} (MPa m ^{1/2})
Alumina (99% purity)	340	300	4.5
Alumina + 25%SiC whiskers	390	900	8.0
Borosilicate glass (Pyrex)		70	0.7
Pyrex + 40%Al ₂ O ₃ CF ^a		305	3.7
LAS ^b glass-ceramic	86	160	1.1
LAS + 50%SiC CF	135	640	17.0
Mullite		244	2.8
Mullite + 20%SiC whiskers		452	4.4

^aCF is continuous fibres

^bLAS is lithiumaluminosilicate

Los materiales que se emplean con refuerzo en estas matrices son el carbono, algunos óxidos, carburos, nitruros y boruros. Una de las características que presenta estos sistemas es su resistencia a la oxidación [21].

3.4.3. *Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC)*

Estos materiales son los más empleados en el sector industrial. A partir de 1980, la producción de aviones tanto militares como civiles comienzan a introducir estos materiales, un 40% del peso total. Sin embargo, es importante incrementar las propiedades de estos sistemas en situaciones de accidentes como las producidas por impacto.

Una de las formas de clasificar los materiales poliméricos es en base al tipo de fibra del que están compuesto. Las fibras más empleadas son las de vidrio (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP), carbono (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) y aramida (Aramid Fiber Reinforced Plastic, AFRP).

Estas propiedades mecánicas que presentan estos materiales poliméricos permiten producir materiales con mejores prestaciones que los de tipo metálico. En estos últimos años los compuestos de carbono son la elección preferente por su elevado módulo de Young. La ciencia de los materiales compuestos se inició a finales de la década de los cincuenta y principios de los sesenta, siendo las fibras de boro empleadas en estos sistemas. Las propiedades de este elemento eran muy similares a las del carbono pero su precio era elevado, lo que hicieron que las fibras de boro fueran sustituidas por las de otro componente.

En la Tabla 6 se encuentran las características de materiales compuestos de matriz polimérica [21].

Tabla 6. *Propiedades de los materiales compuestos de matriz polimérica (Pérez, M.A. (2006))*

	Density (Mg/m^3)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ductility (%)	Flexural strength (MPa)	Specific modulus [(GPa)/ (Mg/m^3)]	Specific strength [(MPa)/ (Mg/m^3)]
Nylon66 + 40%carbon fibre	1.34	22	246	1.7	413	16	184
Epoxide + 70%glass fibres							
unidirectional – longitudinal	1.90	42	750		1200	22	395
– transverse	1.90	12	50			6	26
Epoxy + 60%Aramid	1.40	77	1800			55	1286
Polyether imide + 52%Kevlar		54	253				
Polyester + glass CSM	1.50	7.7	95		170	5	63
Polyester + 50%glass fibre							
unidirectional – longitudinal	1.93	38	750	1.8		20	389
– transverse	1.93	10	22	0.2		5	11

Los materiales compuestos de matriz polimérica se pueden clasificar en tres grupos, termoplásticos, termoestables y elastómeros.

a) Termoplásticos

Las fuerzas de Van de Waals son las que actúan en este tipo de polímeros. Al ser unas fuerzas débiles, la resistencia y rigidez la aporta el monómero junto con un alto peso molecular del sistema.

La naturaleza del polímero puede ser amorfo o cristalino en función del orden estructural en el sólido (grado de cristalinidad). Al partir de un estado líquido, el material puede solidificarse de forma lenta obteniendo un material semicristalino, Figura 13. Una disminución del volumen específico con la temperatura produce una variación de pendiente a una temperatura específica denominada temperatura de transición vítrea, T_g . El comportamiento del material se vuelve viscoso con valores superiores a esa temperatura y frágil, con valores inferiores. Este tipo de polímeros son los que se emplean en los FRP que se explicarán a continuación [21, 24].

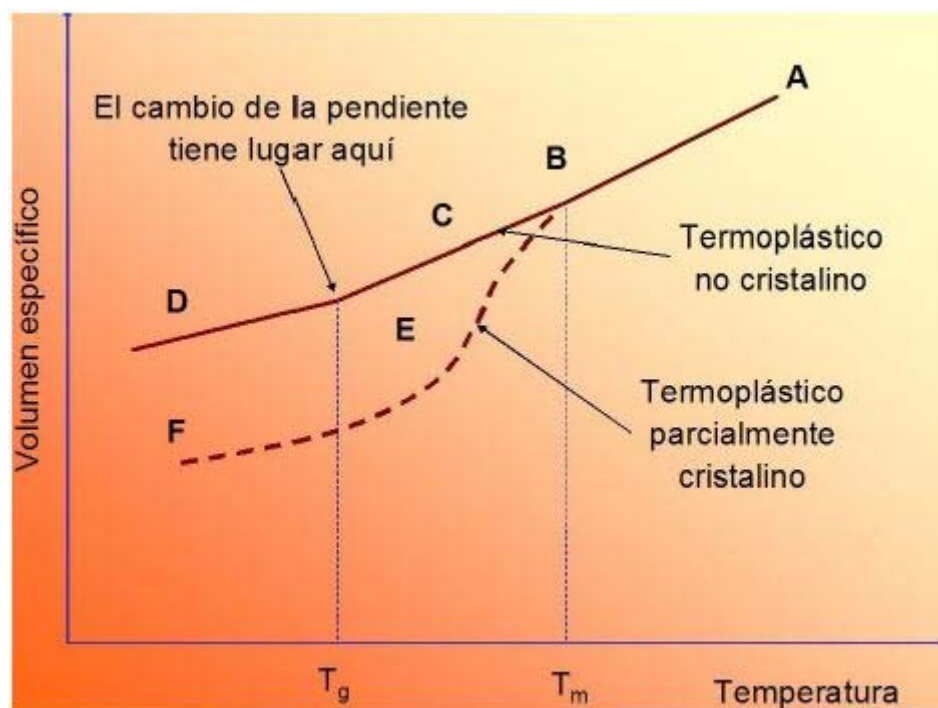


Figura 13. Solidificación y enfriamiento de termoplásticos no cristalinos con cambio de volumen específico con la temperatura (Pérez, M.A. (2006))



b) Elastómeros

Gran deformación elástica al aplicar una carga sobre estos materiales, y al retirar el esfuerzo, el material recupera su estado original. Esto se produce porque la cadena principal está enrollada, y al administrar un esfuerzo, la cadena se estira.

El número de entrecruzamientos de las cadenas o la proporción de azufre determinan la elasticidad del elastómero. Se suele incorporar al material entre un 30 y 40% de azufre, cantidades superiores aumentan la dureza, la rigidez y la fragilidad. Además la adición de azufre hace que la reacción tarde más en realizarse por que es necesario incorporar aditivos.

c) Termoestables

Las uniones de estos polímeros son de tipo covalente. La aplicación de calor o de calor y presión en la etapa de polimerización, hace que las cadenas se unan transversalmente. La fabricación de los termoestables es a partir de dos resinas en estado líquido, una de ellas tiene elementos plastificantes y endurecedores, y la otra, materiales reforzantes.

Las elevadas propiedades de estos materiales hacen que sean propicios para varias aplicaciones del sector de la ingeniería y son las siguientes:

- Alta rigidez
- Estabilidad térmica y dimensional
- Resistencia bajo esfuerzo
- Poco peso

A pesar de todas estas ventajas su mayor inconveniente es que no se pueden reciclar.

3.5. FIBER REINFORCED POLYMER (FRP)

La industria de la construcción se basa en el empleo de compuestos reforzados con fibras, conocidos por sus siglas en inglés FRP (*Fibre Reinforced Polymer*). Los FRP se caracterizan por una gran ligereza, permitiendo una facilidad en el transporte y en la puesta en obra lo que se traduce en menor gasto económico. Excelentes propiedades mecánicas: elevada resistencia y rigidez y una buena resistencia a fatiga. Presentan resistencia a la corrosión y atmosféricos, para aplicaciones que se encuentran en ambientes agresivos y su mantenimiento sea casi nulo. La conductividad térmica es baja

por lo que no se produce interferencias con campos electromagnéticos. Permiten la posibilidad de diversos diseños y formas, esto aporta una gran ventaja ya que los materiales convencionales presentan ciertos límites en el proceso de fabricación. Es importante señalar que la ventaja que presentan estos materiales de poder diseñar cualquier perfil, aporta el inconveniente de la dificultad de estandarizar y normalizar los productos. Este es un requisito imprescindible para generalizar su uso el sector de la construcción.

Los FRP están compuestos por láminas o capas apiladas, denominadas laminados, y las fibras se disponen en cada lámina. La orientación de las fibras hace que los FRP sean materiales anisótropos con valores distintos de las propiedades mecánicas (modulo elástico y resistencia). [4]

3.6. MATRICES

La matriz del FRP transmite las fuerzas entre las fibras por medio de las tensiones de cortadura que se producen en la matriz entre las fibras. Permite la unión de las fibras entre sí, actúa como un elemento protector de la abrasión y del deterioro por la acción del medio ambiente. Posibilita la separación y dispersión de las fibras dentro del FRP. Además, las matrices tienen que ser compatibles tanto química como térmicamente con las fibras.

Las matrices más habituales en sistemas estructurales son de tipo termoestable. Presentan una forma permanente, en general no se puede reciclar ni se funden pero cuando estas sometidas a altas temperaturas se pueden degradar y descomponer. Esta temperatura se denomina temperatura de transición vítrea T_g . Para alcanzar unas propiedades óptimas es esencial que el proceso de curado se realice de forma adecuada.

Las resinas termoplásticas presentan unas propiedades de relajación y fluencia superiores a las termoestables. Últimamente se está estudiando el empleo de resinas termoplásticas como barras de FRP para armar el hormigón, ya que la resina termoestable no tiene la capacidad para ser doblada en obra.

Las resinas termoestables más comunes son poliéster, viniléster y epoxi [4].

3.6.1. Tipos de matrices

a) Resina poliéster

Este tipo de resina es de las más empleadas en el sector de los materiales compuestos, ya que en torno al 90% de los laminados comerciales utilizan este tipo de resina. La clasificación se basa en función de los elementos constituyentes y su aplicación, se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de la resina poliéster en función de los elementos constituyentes y sus aplicaciones (García, S. K. (2007))

Tipos	Aplicaciones
Ortoftálicas	Barcos, placas onduladas y planas
Isoftálicas	Depósitos, ingeniería química
Tereftálicas	Ingeniería química
Tetraftálicas	Depósito para alimentos, cubas
Bisfenólicas	Aplicaciones anticorrosión
Resinas de Tetracloroftálico	Comportamiento a fuego moderado
Resinas de ácido het	Resistencia al fuego, anticorrosión
Resinas de metacrilato metilo	Piezas, cúpulas

b) Resina viniléster

Esta resina presenta una red tridimensional completa formada por cadenas cruzadas, lo que proporciona unas buenas propiedades mecánicas, en particular una alta resistencia a fatiga (en la Tabla 8 se muestran las propiedades mecánicas). La fluidez que tiene permite fácilmente su impregnabilidad y su moldeo. La adhesión de la fibra con la fibra de refuerzo es buena, su resistencia a corrosión es elevada hasta en medios con agua caliente. Además, tiene una buena resistencia a fuego y puede mejorarse mediante la variación de una molécula de viniléster por átomos de boro o cloro, lográndose así una

resina auto-extinguible. Estas características hacen que el coste de esta resina sea de 1,5 a 2 veces superior que la resina de tipo poliéster.

Tabla 8. *Propiedades mecánicas de la resina viniléster (García, S. K. (2007))*

Propiedad Mecánica	
Resistencia a tracción (MPa)	80
Módulo de elasticidad (GPa)	3,39
Deformación a rotura (%)	4,0
Resistencia a flexión (MPa)	140
Módulo a flexión (GPa)	3,72

c) Resina epoxi

La resistencia mecánica que presenta la resina epoxi es superior a la de tipo poliéster y, su rango de temperaturas de trabajo también es mayor que la de poliéster. Tiene una buena adherencia con la fibra de refuerzo, su coeficiente de dilatación térmica es bajo, lo que es de utilidad en el proceso de polimerización. Su estabilidad química es muy importante en medios álcalis. Estas propiedades permiten obtener productos de alta calidad y buena tolerancia dimensional.

En función de la estructura química, las resinas epoxi se puede clasificar en tres grupos: ATGMDA (dianilina tetraglicidil metileno), DGEBA (diglicidil éter de bisfenol) y fenolformaldehído epoxi novolaca. En la Tabla 9 se muestran las propiedades de estas estructuras.

Tabla 9. Clasificación de las resinas epoxis en función de su composición química (García, S. K. (2007))

Tipo de resina epoxi	Propiedad característica
TGMDA	Alto módulo de elasticidad Baja deformación a rotura Alta temperatura de servicio
DGEBA	Menores propiedades mecánicas que la TGMDA Mayor deformación a rotura Menor absorción de agua
Fenolformaldehido epoxi novolaca	Menor deformación a rotura

Las resinas más utilizadas son las TGMDA y DGEBA, en la Tabla 10 aparecen las propiedades de estas resinas [8].

Tabla 10. Propiedades de las resinas epoxis más empleadas: TGMDA y DGEBA (García, S.K. (2007))

Propiedades	TGMDA	DGEBA
Módulo de elasticidad (GPa)	3,8-4,5	2,75-3,45
Deformación a rotura (%)	1-2	5-8
Tg (°C)	175-235	120-175
Absorción de agua (%)	4-6	2-3

3.6.2. *Proceso de fabricación*

a) **Pultrusión**

Los elementos obtenidos mediante este proceso presentan una alta calidad con un elevado contenido en fibras, en torno al 65%.

Las fibras en tipo tejido, hilo, etc. que forman el refuerzo se encuentran enrolladas en bobinas. Estas fibras se estiran, se impregnan con resina y pasan por una zona de conformado donde se disponen con la forma del molde. La resina polimeriza en el molde mediante tratamiento térmico y de presión, se enfría a temperatura ambiente o en agua. Finalmente, pasa por un mecanismo de tirado y se corta la longitud requerida, Figura 14.

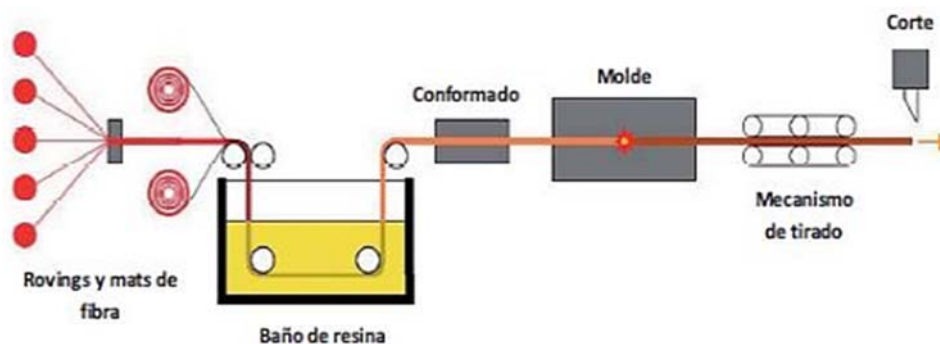


Figura 14. *Proceso de fabricación de FRP mediante pultrusión (Bank, L. C. (2007))*

b) **Moldeo por contacto manual**

Este proceso se basa en uno de los métodos más habituales y simples en la fabricación de materiales compuestos. En un molde se sitúa la fibra en la orientación requerida, se impregna la fibra con sucesivas capas de resina empleando rodillos para favorecer la compactación y la eliminación del aire. En el refuerzo de estructuras este método se realiza in situ con un curado de la resina a temperatura ambiente.

c) Enrollamiento filamentario

Un mandril rotatorio enrolla las fibras mientras que estas son impregnadas con resina de forma longitudinal. Esto es debido a que la velocidad de giro del mandril se sincroniza con la de avance de impregnación, controlando el ángulo de enrollado.

Este método se emplea para reforzar pilares existentes, la fibra se enrolla sobre el pilar directamente.

3.7. FIBRAS

Existe una variedad de fibras que se pueden emplear como refuerzo, y la selección de cada una de éstas dependerá de las propiedades finales del sistema.

3.7.1. Fibras de vidrio

Este tipo de fibras son amorfas basadas en óxido de silicio (SiO_2). Las materias primas para fabricar estos elementos son muy abundantes y baratos. En general, las fibras contienen 50-60% de SiO_2 y el resto óxidos de otros metales. Se pueden clasificar las fibras dependiendo de las aplicaciones y de su composición química:

- **Vidrio E:** Es el tipo más empleado, el 90% de los refuerzos son de este tipo.
- **Vidrio C:** Resistente a la corrosión.
- **Vidrio R:** Altas cualidades mecánicas en relación al comportamiento de fatiga, temperatura y humedad. Su principal aplicación es en el sector aeronáutico.
- **Vidrio D:** Buenas propiedades dieléctricas con pocas pérdidas eléctricas y se emplea en circuitos impresos de alto rendimientos
- **Vidrio AR:** Resistencia compuesto alcalinos, desarrollado para el refuerzo de hormigones y morteros.

La Tabla 11 muestra las distintas propiedades mecánicas de estos vidrios.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de los distintos tipos de vidrio (Águila, V. (2010))

Propiedades	Vidrio E	Vidrio D	Vidrio R	Vidrio AR
Densidad (g/cm^3)	2'60	2'14	2'53	2'68
Resistencia a la tensión (MPa)	3600	2500	4400	3600
Módulo elástico (GPa)	75'5	55	86	70
Resistencia a la rotura (%)	4'5	4'5	5'2	4'3

Las propiedades que presentan las fibras son isotrópicas como consecuencia de la estructura tridimensional del vidrio. Presentan una alta resistencia y la rigidez está limitada. Son resistente al fuego y ataques químicos, pero la humedad puede conducir una reducción importante de la fuerza, además, el vidrio E puede sufrir corrosión en medios alcalinos (cemento). Las propiedades mecánicas decaen rápidamente por encima de 400°C-500°C debido a la fusión. La temperatura de fusión (y la viscosidad) aumenta con el contenido de SiO₂. Este tipo de fibras se suele emplear en refuerzos que no requieren una rigidez crítica.

El proceso de fabricación de las fibras de vidrio se basa en la molienda y la mezcla de arena, carbonato de sodio, piedra caliza y cristal reciclado, hasta obtener una composición homogénea. A continuación, se introduce la mezcla en un horno de fusión directa y se calienta a temperaturas en torno a 1550°C. Una vez que el vidrio se ha fundido, se introduce por unos canales que alimentan las hilas con unos agujeros de dimensiones determinadas. Para que se obtengan fibras de vidrio con un diámetro de algunas décimas de milímetro, el vidrio se tiene que mantener a unos 1250°C. El vidrio se estira a la salida de la hilera con unas velocidades entre 10 y 60 m/s y se procede a un enfriamiento de dos fases: una primera por radiación y la segunda, por pulverización de agua fría. Los filamentos se recubren de una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos a una temperatura comprendida entre 60 y 120°C. Este proceso corrige los defectos que presentan las fibras. Posteriormente los filamentos son bobinados y se dejan secar para eliminar el exceso de agua. [2]

3.7.2. Fibras de carbono

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, consiste en láminas de átomos de carbono siguiendo un patrón hexagonal regular. La diferencia se encuentra en la forma en que se vinculan las láminas. En el grafito las capas se apilan paralelas entre sí de forma regular y las fuerzas intermoleculares son débiles, fuerzas de Van der Waals. En las fibras de carbono el tipo de precursor empleado determina la forma en que las estructuras estarán. Las fibras derivadas del PAN (poliacrilonitrilo) las láminas de átomos de carbono se apilan al azar o de forma regular (turbostrático), mientras que las procedentes de brea mesofase el apilamiento es grafitico. Estas estructuras influyen en las propiedades de la fibra, en el caso presentan una alta resistencia a tracción y el otro caso, el módulo de Young es elevado y una alta conductividad (Figura 15).

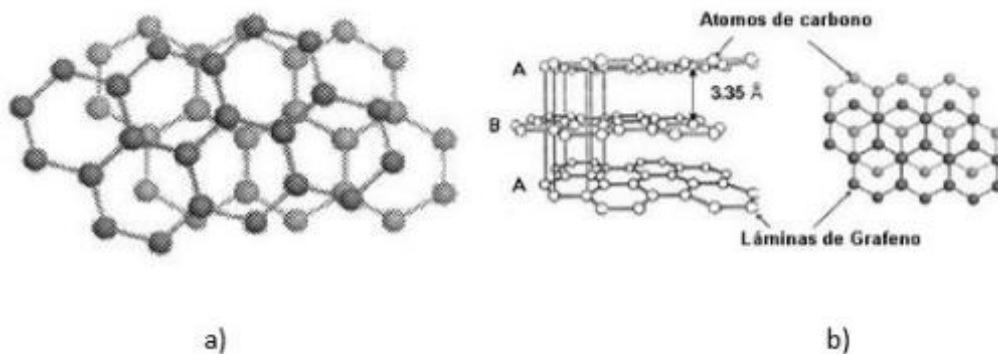


Figura 15. Estructuras de las fibras de carbono a) Apilamiento turbostrático
b) Apilamiento grafítico (Águila, V. (2010))

Este tipo de fibras presentan alta resistencia mecánica y rigidez, mejor durabilidad en ambientes húmedos y agresivos con un bajo coeficiente de dilatación térmico. Se pueden obtener con alto módulo y alta resistencia como se mencionó anteriormente. Son estructuras frágiles con una recuperación del 100% cuando se cargan por debajo del límite de rotura. Los módulos transversal y de cortadura son más pequeños que el longitudinal y depende de la estructura estratificada.

El tejido de fibras de carbono procede de una mezcla de polímeros, el más utilizado es el PAN (poliacrilonitrilo) que por ser la materia prima se llama precursor y normalmente se combina con otros polímeros derivados del petróleo, carbono concentrado proveniente de restos de materia orgánica. La primera etapa del proceso se basa en estirar las fibras del precursor para darle la orientación molecular requerida. De manera que tenga estabilidad dimensional y se funda en el proceso. Posteriormente, el polímero se oxida en una atmosfera de aire a una temperatura comprendida entre 200-300°C. El oxígeno se une al PAN y se forma una estructura hexagonal. Una vez que las fibras están estabilizadas, se someten a temperaturas superiores a los 1000°C en una atmósfera inerte. Durante el periodo de calentamiento, los átomos de nitrógeno e hidrógeno desaparecen y los anillos de carbono hexagonales puros se orientan a lo largo de la longitud del hilo (fibras de resistencia media). El tratamiento de carbonización entre 2000°C y 2500°C aporta una resistencia elevada a la fibra. Este calentamiento se realiza en una atmosfera sin oxígeno que alinea las cadenas poliméricas hasta formar las hojas de grafeno. El siguiente paso es la grafitización, consiste en un tratamiento de calentamiento por entre 2500°C y 3000°C, el tamaño de los cristales aumenta y mejora la orientación de los anillos en la fibra. Finalmente, las fibras pasan por una cámara donde se le aplica un catalizador que hace que una resina se adhiera a la fibra. En este

estado se tejen las fibras para formar las láminas y tubos que luego serán impregnados con resina epoxi en un molde [2, 4].

3.7.3. Fibras de aramida

Las fibras de aramida se basan en las cadenas aromáticas de poliamida llamada poliparafenileno tereftalamida y están estrechamente relacionadas con otra fibra de la misma familia, el nylon.

Estas fibras son fuertes y rígidas con un alto alargamiento a rotura (puede alcanzar el 3,5-4% en kevlar 29), hace que la aramida sea adecuada para la protección contra el impacto. La resistencia a compresión es aproximadamente 1/8 de la resistencia a atracción debido a la estructura anisotrópica que presenta, Figura 16. Buenas propiedades de amortiguación, y sensibilidad a la radiación ultravioleta (300-400 nm) que conduce a la rotura de los enlace químicos y la degradación de las propiedades mecánicas.



Figura 16. Estructura de la fibra de aramida (Águila, V. (2010))

La presencia de grupos aromáticos reduce la solubilidad de las fibras de aramida, y no pueden ser procesados por técnicas convencionales. En cambio, se realiza un proceso de extrusión e hilado a partir de una solución de aramida aromática en ácido sulfúrico. La solución del polímero se realiza a una temperatura entre -50°C y -80°C, y la extrusión se realiza en un cilindro caliente a 200°C. Esto provoca la orientación de las cadenas moleculares en la dirección de las fibras durante el estirado, se evapora el solvente y la fibra se enrolla en una bobina. Las variaciones de hilado, de tratamientos térmicos tras

el hilado o la adición de los distintos aditivos al solvente, pueden a las propiedades de las fibras.

Se distinguen tres tipos de fibras disponibles en el mercado, empleadas para el refuerzo de las matrices de cemento. Estas fibras presentan distintas propiedades mecánicas, Tabla 12 [2,6].

Tabla 12. *Propiedades mecánicas de tres fibras de aramida presentes en el mercado (Águila, V. (2010))*

Propiedades	Kevlar 49	HM-50	Twaron
Modulo de Elasticidad (GPa)	127.5	75.5	125
Resistencia a Tracción (MPa)	2'640	3'040	2'800
Deformación de Rotura (%)	2.4	4.2	2.0
Diámetro (10 ⁻⁶ mm)	10	12.2	—
Peso específico	1.45	1.39	1.45

Los FRP se caracterizan por una alta resistencia y por un bajo peso, estas propiedades resultan ser superiores en muchos casos a los materiales metálicos. Además, la relación resistencia/peso es muy buena. Por estas propiedades, estos materiales han reemplazado a los convencionales en un gran número de aplicaciones como componentes resistentes.

El refuerzo fibroso aporta al compuesto una resistencia mecánica adecuada y la matriz, proporciona elasticidad, resistencia química y térmica, sobretodo bajo peso. Estos refuerzos pocas veces presentan una morfología tipo partícula, lo habitual son fibras que pueden ser cortas o según las prestaciones exigidas por el compuesto resultante [5].

3.8. IMPORTANCIA DE LA INTERFAZ

La zona de contacto entre la matriz y la fibra se denomina interfaz. Esta región permite la transmisión de esfuerzos de la matriz al esfuerzo. Además, las propiedades de la matriz alrededor de la interfaz pueden ser modificadas por la presencia de la fibra. Existen varios mecanismos de interacción: interacción por humectación, interdifusión, atracción electrostática, enlace químico y adhesión mecánica.

3.8.1. Interacción por humectación

Mecanismo de interacción de dos superficies, una sólida y una líquida, eléctricamente neutras suficientemente próximas de forma que se produzca una atracción física. La fase sólida presenta rugosidad permitiendo que la fase líquida cubre por completo la superficie sólida sin que quede aire entre las fases, Figura 17.

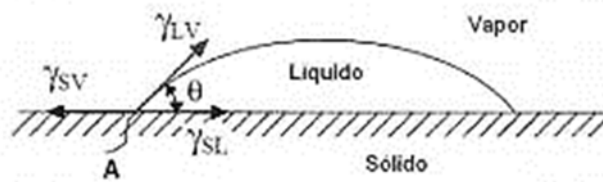


Figura 17. Ángulo de contacto entre la fase sólida y la mojante (Granda, L. A. (2016))

La ecuación de Young (1) expresa el equilibrio mecánico de las tensiones intersticiales: γ_{SL} es la tensión sólido-líquido, γ_{SG} tensión sólido-gas y γ_{LV} tensión líquido-gas

$$\gamma_{sv} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

Se denomina **ángulo de contacto (θ)** al formado entre la superficie del sólido con la fase mojante. Para que se produzca humectación completa el valor de θ es de 0, valores comprendidos entre $0 < \theta < 90$ se da una mojabilidad parcial y ángulos $\theta > 90$, la superficie se moja es menor y mayor es la hidrofobidad [11,16].

3.8.2. Interdifusión

Este mecanismo se basa en la unión de dos superficies poliméricas: las cadenas libres de uno de los polímeros se difunde en la red molecular del otro polímero, Figura 18.

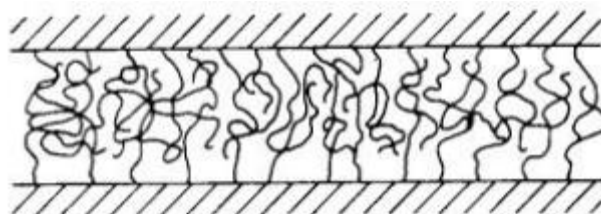


Figura 18. Esquema interdifusión formado por el enmarañamiento molecular (Granda, L.A, (2016))

La presencia de agentes plastificantes y disolventes, el grado de difusión de la conformación molecular, los constituyentes que intervenga y la facilidad de movimiento molecular, pueden favorecer la interdifusión. Este fenómeno permite explicar en parte la unión de las fibras recubiertas con un polímero antes de su incorporación en la matriz y suele ser denominado autoadhesión por la relación con los adhesivos [11].

3.8.3. *Atracción electrostática*

Atracción entre los componentes de un material debido a la diferencia de carga de sus superficies. Estas interacciones solamente son efectivas en distancias cortas (atómicas), por lo que es esencial que la matriz y la fibra este en contacto próximo. La efectividad de este mecanismo disminuye por la presencia de gases atrapados y contaminantes superficiales, Figura 19. La atracción electrostática no contribuye principalmente en la unión refuerzo-matriz. En el caso de la fibra de vidrio es importante en el proceso de fijación de los agentes sobre la superficie del refuerzo.

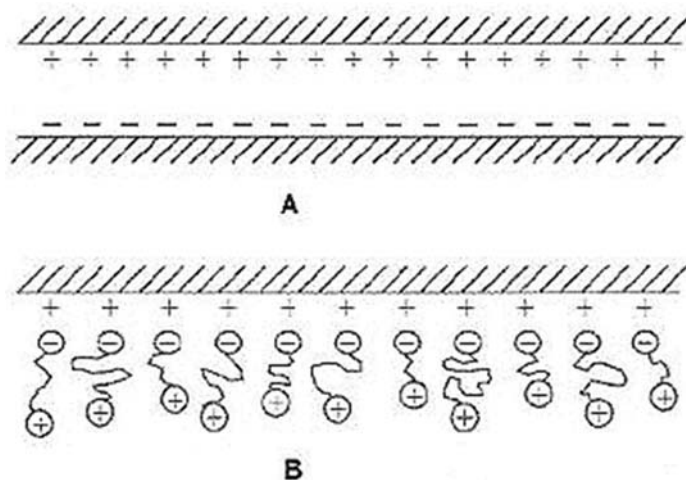


Figura 19. Esquema atracción electrostática (Granda, L.A (2016))

3.8.4. *Enlace químico*

Esta interacción se debe a los grupos químicos que presentan la matriz y el refuerzo depende del número de enlaces por unidad de área y del tipo de enlace. En la zona interfacial (refuerzo-matriz) se pueden formar compuestos y soluciones sólidas por el

transporte de moléculas, átomos o iones (difusión) en el que están involucradas las uniones químicas, Figura 20. Este tipo de enlace es esencial en materiales con fibras que emplean adhesivos, porque explica la relación matriz-fibras [11].

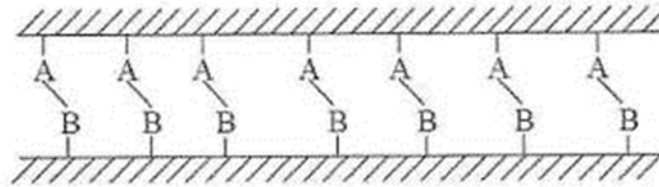


Figura 20. Esquema adhesión por enlace químico (Granda, L.A. (2016))

3.8.5. Adhesión mecánica

Este tipo de interacción es resultado de la interpretación mecánica de las superficies. La rugosidad de la superficie de la fibra influye en la resistencia a cizalla y a tracción en la unión matriz-fibra, así como los esfuerzos internos dentro del material [8,11].

3.9. FORMATOS DE FRP PARA REFUERZOS DE ESTRUCTURAS

3.9.1. Sistemas para molde manual en húmedo (*wet layup*)

En las estructuras que necesitan ser reforzadas, se colocan directamente los tejidos de fibras secos unidireccionales o multidireccionales. Para una buena adherencia al hormigón se emplea resina con baja viscosidad y el curado de este elemento de refuerzo, se produce a temperatura ambiente.

3.9.2. Sistemas preimpregnados

Los tejidos de fibras unidireccionales o multidireccionales están impregnados con resina parcialmente curada en la fábrica. Este sistema se coloca en el hormigón, en función del elemento a reforzar esa cantidad de resina no será suficiente por lo que se añadirá más cantidad de resina. El curado total del sistema se realizará mediante la aplicación de calor, Figura 21.



Figura 21. Sistema de refuerzo por moldeo manual (Bank, L. C. (2007))

3.9.3. Sistemas prefabricados o precurados

Estos sistemas se colocan directamente en el hormigón por medio de un adhesivo, como se muestra en la Figura 22. Uno de los más empleados son los compuestos fabricados por pultrusión de fibras de carbono unidireccional con resina epoxi. Comercialmente se pueden encontrar con espesores de 1-1.5 mm con anchuras comprendidas entre 50 y 150 mm.



Figura 22. Sistema de refuerzo con elementos prefabricados (Bank, L. C. (2007))

3.9.4. *Sistemas insertado en el recubrimiento (NSM)*

Elementos prefabricados por pultrusión que se insertan en el recubrimiento de la estructura a reforzar. En el hormigón se realizan surcos los cuales se rellenan con resina y el laminado de FRP. Se conocen como *Near Surface Mounted (NSM)*, Figura 23 [23].



Figura 23. Sistema de refuerzo con elementos NSM (Rasheed, H. A. (2014))

3.10. EVOLUCIÓN HISTÓRICA REHABILITACIÓN Y REFUERZO

En la rehabilitación o reparación de las infraestructuras es necesario un estudio preliminar del estado en el que se encuentra. En esta evaluación se debe indicar las condiciones y defectos del hormigón, examinar la documentación relacionada con la estructura como los planos, historial de mantenimiento y reparaciones, etc. Esta valoración debe ser concorde con el reglamento de construcciones de hormigón ACI (ACI 364.1R para la rehabilitación y ACI 437 R, evaluación del estado tensional del hormigón en edificación,...).

El técnico debe analizar las dimensiones de la estructura, la ubicación y cantidad de acero presente, la existencia de corrosión, el tamaño y localización de las grietas, las prestaciones mecánicas del hormigón, sobretodo en la zona donde irá ubicado el refuerzo FRP [22].

Los motivos para reforzar una estructura son los que se muestran a continuación:

- Cambio de uso en la edificación. Esto se basa cargas más elevadas que las que se previeron inicialmente en el proyecto.

- Asentamientos diferenciales. En la cimentación se originan grietas por los defectos que presenta el suelo y no se tuvieron en cuenta el proyecto
- Fallos en la etapa de diseño o proyecto que pueden afectar a la resistencia de la estructura y su durabilidad
- Problemas ocasionados en la etapa de construcción por la realización de las obras con personal poco cualificado
- Desgaste de los materiales de construcción debido a los agentes químicos que se encuentran en el ambiente y por el transcurso del tiempo
- Alteración y supresión de forma total o parcial componentes estructurales
- Defectos ocasionados por diversas incidencias (exposición al fuego, colisiones, detonaciones, etc.) que hacen que la resistencia de la estructura pierda parte de su resistencia
- Cambios de criterios en situaciones de seísmos
- Variación en las normas y reglamentos de diseño de las infraestructuras

Estas circunstancias llevan a determinar la situación en la que se encuentra la infraestructura y la manera de realizar un refuerzo de la misma mediante diferentes materiales y técnicas, logrando que la estructura sea segura.

La técnica más habitual para reforzar cualquier estructura, ya que garantiza un alta efectividad y en mayor medida en estructuras sometidas flexión, es el encolado de chapa metálica con adhesivo estructural. Sin embargo, estos materiales presentan ciertos problemas:

- Peso elevado que complica las actividades de transporte, manejo y su puesta en obra
- La longitud máxima de estas laminas está limitada 6 a 8 metros por lo que se tienen que realizar juntas o traslapes
- Necesidad de elementos importantes para el apuntalamiento por su densidad alta. Esto puede producir ciertos problemas puesto que su ejecución se realiza con edificios en funcionamiento
- La superficie del acero unido al adhesivo se pueden ocasionar corrosión en esa zona de contacto, perjudicando la conexión del hormigón y de la lámina metálica

Los inconvenientes que presentan los materiales metálicos empleados como refuerzos y la cantidad creciente de estructuras que necesitan ser reforzadas, hacen que estos materiales sean inapropiados en ciertas ocasiones. Ante esta situación es importante

investigar una alternativa que sea competente y económica, por lo que los materiales compuestos son una solución interesante.

La introducción de estos nuevos materiales se inició en la segunda mitad del siglo pasado, en el sector de la construcción y supuso de manera significativa a los materiales metálicos. Ahora bien, su desarrollo no fue de manera lineal y continua, se produjo la segunda guerra mundial y el sector de la metalurgia adquirió gran importancia. Concluido este período, los materiales metálicos se ven desplazados por los de tipo cerámicos y poliméricos y se analiza el empleo de materiales compuestos como refuerzo de elementos estructurales.

El progreso en la investigación de materiales poliméricos reforzados con fibras ha creado materiales con unas características elevadas que permiten su utilización como elemento reforzante en estructuras en el cual los materiales convencionales han producido problemas [7].

Los avances en la tecnología de los materiales compuestos han llevado a numerosos estudios sobre piezas de hormigón con refuerzos entre los que destacan los polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP), los polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) y los polímeros reforzados con fibras de aramida (AFRP). Estos refuerzos han ganado popularidad en Europa, Japón, Estados Unidos, Canadá, Latinoamérica, etc., ya que se trata de estructuras de poco peso con alta resistencia y rigidez, buenas propiedades frente a la corrosión y a la degradación ambiental.

En Estados Unidos desde 1930 ha tenido un interés constante y continuo por este tipo de refuerzo en estructuras de hormigón. Las iniciativas de National Science Foundation (NSF) y de Federal Highway Administration (FHWA) hicieron que en 1980 se comenzaran a emplear estos materiales.

En la década de 1980 se desarrollaron los sistemas de FRP tanto en Europa como en Japón para el refuerzo de puentes y edificios. Previamente se realizaron trabajos experimentales, en Alemania en 1978, para la modernización de las estructuras de hormigón y en Japón en 1980, en columnas de hormigón armado para proporcionar confinamiento adicional [21]. Los ensayos fueron llevados a cabo por *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA), en Suiza y en Alemania, *Institute for Building Materials, Concrete Construction and Fire Protection* (iBMB-Tecnishe Unisesiät Braunshweig). La capacidad de estos materiales fue validada por el centro estadounidense *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) y centros de Canadá y a Japón.

La primera aplicación de este sistema de refuerzo fue en el puente alemán Kattenbush Bridge entre 1986 y 1987. Se emplearon tiras de laminados polimérico reforzado con fibras de vidrio. (19) En 1980 *Swiss Federal Laboratories for Materials Scienc and Technology* (EMPA) realizaron pruebas con esta tecnología y en 1991 se llevó a cabo la primera estructura con láminas encoladas de materiales compuesto con fibras de carbono, puente de Ibach en Lucerna [21]. Otro ejemplo, empleado esas fibras de carbono, es el refuerzo de un total de 250 estructuras. Esto supuso un ahorro de material ya que la cantidad utilizada de material compuesto fue de 17.000 kg, en lugar de 51.000 kg de acero.

En Alemania y Suiza, la divulgación de documentos que verificaban su homologación e indican unas recomendaciones sobre los sistemas CFRP, hizo posible un aumento de seguridad en la producción y aplicación de estos materiales en construcción. Posteriormente, la práctica de laminados se difundió en la recuperación de los edificios históricos de Grecia, y como refuerzo en situaciones de seísmos en los forjados, muros y paredes de Italia. En 1995 se inicia la comercialización de los sistemas de refuerzo por empresas de Suiza y Alemania.

La primera aplicación de FRP en Japón fue refuerzos y confinamiento de elementos en un puente de Tokio en 1992. Estos refuerzos adquieren importancia emplazamientos con seísmos, situaciones de flexión y cortante. La forma de los sistemas FRP puede ser de tipo manta, continuos y unidireccionales, o tejidos, multidireccionales. En 1995 en la ciudad de Kobe quedo arruinada por el terremoto que tuvo lugar. La reconstrucción de la ciudad se llevó a cabo con materiales compuestos, lo que indica importancia de estos sistemas. *Japan Concrete Institute* (JCI) publica en 1998 un documento sobre el refuerzo de hormigón con sistemas FRP.

Estados unidos y Canadá también realizaron estudios basados en el refuerzo de hormigón con sistemas FRP. En regiones sísmicas adquirieron importancia la técnica CALTRANS en el refuerzo exterior de pilares con encamisado con mantas de vidrio. En los años 1993 y 1994, las ciudades de Los Ángeles y Santa Mónica se beneficiaron de este método en estructuras de tipo pilar para puentes y en edificios, incrementando así su comportamiento cortante.

En España no se empezó a utilizar en obras importantes hasta el año 1996 en el tablero del puente del Dragó en Barcelona. El puente resulto afectado por el impacto de un vehículo en la armadura longitudinal del centro del vano. La reparación de esta infraestructura requería ser efectuada en el menor período de tiempo debido a motivos de seguridad estructural y por la demanda de servicio. De todas las alternativas

estudiadas se optó por el empleo de materiales compuestos, el resto de opciones ofrecían plazos de ejecución mayores. Además, estas láminas presentaban limitación de la longitud (6 a 8 metros), requerimiento de estructuras auxiliares, problemas de corrosión en las chapas de acero y la elevada rigidez de estos materiales, era necesario una planeidad en la superficie de encolado [10]. En 1997 durante la Feria Construmat esta obra recibe el Premio Construmat al sistema más innovador, es en este momento cuando se empieza a emplear este refuerzo en España. En este mismo año se efectuaron varios estudios relacionados con el refuerzo de hormigón con FRP en la Universidad Politécnica de Cataluña:

- Vigas con fibras de aramida (AFRP) y tejidos de CFRP, se analizó la resistencia de la estructura en estado virgen y con los refuerzos.
- Ensayos en perfiles reforzados con AFRP y tejidos de CFRP.
- Estudio del fallo de las fibras de carbono en mantas.
- Vigas de hormigón con laminados y mantas de fibras de carbono aplicando la técnica MBrace, analizando la resistencia a flexión de estos materiales.

En Portugal en el año 2001 se celebró el congreso “*CCC2001 Composites in Constructions*”, se describieron las distintas composiciones entre los materiales convencionales y los compuestos avanzados en el sector de la construcción. En el 2002, un grupo de investigadores españoles analizó el refuerzo de hormigón con materiales compuestos en probetas con diferentes resistencias y fibras. Otras líneas de investigación fueron la reparación de puentes con fibras de carbono, el comportamiento a flexión de los materiales compuestos y el empleo de las herramientas de simulación numérica en cargas a compresión. En el año 2003 se estudió en casos prácticos las fibras de carbono para reforzar infraestructuras. Actualmente, el Laboratorio de Tecnologías de Estructuras (LTE) de la Universidad Politécnica de Cataluña está realizando pruebas en muros de obra con FRP.

Los modelos de laboratorio muestran que las propiedades de los FRP son exitosas, sin embargo su aplicación aún sigue limitada. En los últimos diez años Europa, Japón, Canadá y Estados Unidos han desarrollado las normas y códigos de los refuerzos de FRP.

Los documentos relacionados con el uso de materiales de FRP en estructuras de hormigón han sido publicados por Japan Concrete Institute (JCI) y Railway Technical Research Institute (RTRI). Una guía de diseño del refuerzo FRP en hormigón armado por la International Federation For Structural Concrete (FIB) y por Canada Standards Association e ISIS. La sección 16, “Fiber Reinforced Concrete” de Canadian Highway Bridge Design Code se completó en el 2000 (CSA S806-02) y la Canadian Standards

Association (CSA) aprobó, en el 2002, el código “Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers” (CSA S806-02). En Estados Unidos, el criterio por evaluar los sistemas de FRP está empezando a estar disponible en la industria de la construcción (AC125 1997) [10, 12, 18].

Actualmente el número de realizaciones de este tipo de estructuras, tanto de puentes como de edificios, asciende a más de un millar a nivel mundial.

3.11. SITUACIÓN DEL FRP

Los beneficios que presentan los materiales compuestos cada vez son más conocidos y su empleo en la ingeniería está aumentando, de manera que para el año 2020 se espera que el mercado de estos materiales a nivel mundial aumente 40 % desde el 2014 como se ilustra en la Figura 24 [15].



Figura 24. Previsión mercado materiales compuestos en diferentes sectores de aplicación (Job, S.; Leeke, G.; Tarisai, P.; Oliveux, G.; Pickering, S. y Aizat, N. (2016))

Estos procedimientos se caracterizan por la unión del material de refuerzo en el área del hormigón a reparar. El comportamiento del material compuesto en este sistema es de una protección externa, siendo esta forma de actuación muy parecida a la de una armadura interna del acero. Esto es debido a las elevadas propiedades mecánicas que presentan dichos materiales y sobretodo en resistencia a tracción.



Los modos de colocación es de forma de piel rasante en las estructuras de hormigón y son de dos tipos: laminados preconformados y los textiles. El refuerzo tiene otra forma de aplicación como material estructural externo.

a) Refuerzo con laminados preconformados

En este tipo de refuerzo, la disposición de las fibras es de tipo unidireccional y se encuentran concentradas en una matriz de resina. Las dimensiones de los refuerzos suelen ser de 50-150 mm de ancho con un espesor de 1-2 mm y se disponen en rollos con longitudes comprendidas entre 100 y 500 m en las obras se cortan las extensiones requeridas y se colocan en la superficie a reparar.

La fabricación de estos laminados preconformados es de tipo industrial, al controlar las condiciones de producción se obtiene un producto de alta calidad con homogeneidad en sus propiedades. El adhesivo empleado es la resina epoxi para la unión de los laminados. Los constituyentes de la resina son de alta tixotropía con una consistencia pastosa, estas características facilitan su aplicación en techos o superficies verticales sin producir la separación ni el derramamiento del material durante la colocación. El adhesivo debe presentar las siguientes propiedades para que pueda ejercer su función:

- Buena resistencia, especialmente a tracción y cizalla
- Alta temperatura de transición vítrea
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados

b) Refuerzo con tejidos de fibras

Los tejidos que conforman este refuerzo se producen por el trenzado de las fibras y estas pueden ser de vidrio, carbono y aramida. La dirección de las fibras en el material compuesto es en la trama principal un porcentaje entre 95-98% dispuestas longitudinalmente y en la trama secundaria, un 2-5% en forma transversal. El espesor del tejido suele encontrarse entre 0,1 y 0,5 mm con una densidad de 200-800 g/cm³, el ancho de 200-600 mm y se disponen en rollos de 40 y 100 m, estos se cortan las mediadas requeridas para su posterior puesta en obra. La colocación consiste en ponerlo en la extensión del hormigón a reforzar con la necesidad de resina epoxi. Para que la resina impregne las fibras del tejido tiene que encontrarse en estado fluido y se tiene que dar una configuración al material, lo que suponen una dificultad en su puesta en obra.

c) Refuerzo con perfiles

Este refuerzo presenta un sistema laminado preconformado con perfil en forma de “L” diseñado para su colocación en ángulos rectos siendo y es una solución ideal en situaciones que se requieren esfuerzos de tipo cortante. La forma en la que se encuentra este material es en piezas largas entre 30 y 100 cm para cada uno de los brazos permitiendo su adaptación en las medidas de las vigas. La resina empleada es la epoxi al igual que en los refuerzos de laminados preconformados.

Los preconformados pueden presentar distinta diversidad en la sección de las barras: rectangular, cuadrada, redonda, etc. La colocación de estos elementos en las vigas de hormigón puede ser como anclajes de perforaciones transversales o dentro de canaladuras longitudinales.

d) Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo

En términos generales hay tres formas de fijar el refuerzo: colocación en la superficie a reforzar de los perfiles FRP y laminados, refuerzos con hojas y perfiles que ubican a lo largo de todo el material en canaladuras que se denominan NSM, *Near Surface Mounted* (Figura 25). Las propiedades de cada uno de los sistemas se muestran recogidas en la Tabla 26.

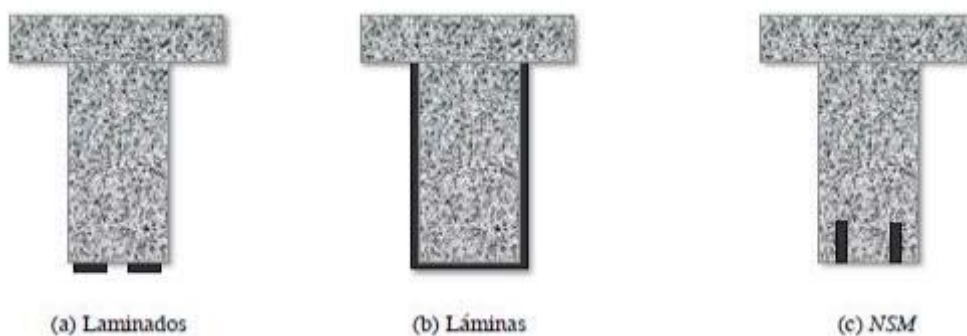


Figura 25. Sistemas de aplicación del refuerzo (Pérez, M.A. (2006))

Tabla 13. Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo (Pérez, M.A. (2006))

	Laminados	Láminas	NSM
Forma	Tiras rectangulares y perfilera	Tejido unidireccional o bidireccional	Laminados o perfiles embebidos
Espesor	1,0 - 2,0 mm	0,1 - 0,5 mm	1,0 - 10,0 mm
Anchura	50 - 150 mm	200 - 600 mm	10 - 30 mm
Uso	Unión simple con adhesivo de perfiles y laminados prefabricados	Unión e impregnación de la fibra seca con resina y curado <i>in situ</i>	Unión simple de perfiles y laminados prefabricados con adhesivo en un ranurado
Observaciones y Aplicaciones	Para forjados. Unión con adhesivo tixotrópico. No son recomendadas más de una capa. La rigidez del laminado y el uso de adhesivos tixotrópicos permite ciertas irregularidades de la superficie. Sencillez en el uso. Calidad garantizada desde la fábrica. Adecuado para reforzar en curvas o ángulos. Necesita estar protegido contra el fuego.	Fácil de aplicar en superficies curvas. Resina con baja viscosidad para unir e impregnar. Se pueden usar múltiples capas (más de 10 son posibles). Las irregularidades deben ser niveladas. Puede ser combinado con sistemas de acabados como el yeso o la pintura. Adecuado para cortantes o refuerzos en curvatura. Necesita estar protegido contra el fuego.	Depende de la distancia al armado. Las ranuras deben ser serradas en la superficie del hormigón. Las ranuras deben estar limpiadas cuidadosamente antes de la unión. Unión con adhesivo tixotrópico. Es posible utilizar mortero de cemento para la unión. Adecuado para refuerzo en curvatura. Protección mínima contra el fuego.

En el sector de la ingeniería civil hay varios casos donde se emplean materiales compuestos reforzados con fibras en puentes. La clasificación de estos refuerzos se realiza en base a su funcionalidad:

- Refuerzo exterior de puentes con laminados FRP. Los materiales empleados son de fibra de carbono y resina epoxi. Existen dos tipos: láminas prefabricadas de fibra y de resina que se colocan en la superficie del puente, y tejidos de fibras que se fijan a la estructura con resina, al curar la resina se configura in situ un material compuesto.
- Hormigón armado con redondos de FRP. Estos redondos sustituyen a la tradicional armadura de acero, esto impide que surjan los inconvenientes habitualmente que se dan en dichas armaduras como la corrosión.
- Cables y tendones de pretensado. Estas estructuras presentan una elevada resistencia, buen comportamiento a fatiga y a corrosión, lo que reduce su coste de mantenimiento. Se emplean fundamentalmente fibras de aramida y carbono.

- Perfiles tipo FRP o elementos tipo sándwich. Estos elementos se emplean en las pasarelas de los puentes como sustitutos de las del hormigo armado. Esta alternativa es la menos empleada debido a las dificultades que presentan.

La tipología de los FRP presenta la misma forma que los materiales metálicos convencionales. Para lograr un mayor provecho de estos materiales compuestos, se están realizando investigaciones de manera que aporten unos beneficios superiores que los empleados tradicionalmente. Así mismo, se tiene que estudiar el comportamiento del adhesivo a lo largo de toda la vida de la estructura (puesta en obra y envejecimiento). En las atornilladas de FRP surge el inconveniente de que se produce un acortamiento de las fibras y se originan tensiones en las zonas débiles del material. Una alternativa a este problema es la utilización de adhesivos.

La aplicación de estos materiales está muy avanza en el área de la ingeniera civil sobre todo en pasarelas peatonales y puentes de pequeñas luces. En el mundo de la edificación su aplicación es menor a causa del alto coste de los perfiles de FRP y también por el riesgo de incendio [4,21].

3.11.1. ESTRUCTURAS HÍBRIDAS

El elevado coste y la experiencia insuficiente en la etapa de diseño, hicieron que la única aplicación de los FRP fuese la restauración de las estructuras. Esto implica la reconstrucción, la solidificación y el refuerzo en general e incluso en situaciones de sismos. Aún se sigue investigando estos materiales por los beneficios que aportan como elementos reforzantes.

Recientemente se ha planteado la elaboración de elementos íntegramente compuestos por FRP o la combinación de estas estructuras con otro tipo de constituyentes (hormigón, madera o metal). Este elemento híbrido presenta las características propias de los FRP con un precio bajo y la confiabilidad de los materiales convencionales. En la Figura 26 se muestra los empleos en el sector de la ingeniería civil [21].



Figura 26. El FRP y su aplicación en la ingeniería civil (Pérez, M.A. (2006))

3.11.2. Perfiles estructurales de PFRP

El método de producción es mediante extrusión por estirado, se basa en una técnica continua y productiva para la elaboración de sistemas de sección transversal cortante. En 1950 en Estados Unidos se empezó a utilizar esta tecnología y no fue hasta finales de la década de los 70 cuando se aplicó a elementos no estructurales. Los componentes de estos perfiles son fibras de vidrio (GFRP) o de carbono (CFRP) como elemento de refuerzo, y resina termoestable de tipo poliéster, viniléster y epoxi.

En una lámina de espesor pequeño se sitúan las fibras en dirección longitudinal y esteras de filamento continuo. La colocación de los elementos en el perfil de la estructura aportará resistencia longitudinal, gracias a las fibras, y resistencia a cizalladura debido a los tejidos. El refuerzo en un sistema estándar se encuentra en una proporción entre el 40 y 80% fracción en volumen. Otro componente en estos sistemas de PFRP son materiales con carga inorgánica, catalizadores químicos, agentes de liberación, retardantes de ultravioleta y de fuego, pigmentos y velos superficiales. El coste de los GFRP suele rondar en torno a 2-10 €/kg y los de tipo CFRP, suele ser mayor por el alto rendimiento que presentan.

En edificios y puentes, el diseño de los perfiles de PFRP ha emulado la forma que presentan los materiales metálicos, lo que no es favorable por la anisotropía que tiene el material compuesto. En la Figura 27 se ilustran las geometrías típicas de los GFRP de tipo I, H, tubo y ángulo recto. Actualmente, no hay un diseño estándar ni un acuerdo entre los fabricantes con respecto las características física-mecánicas y la geometría.

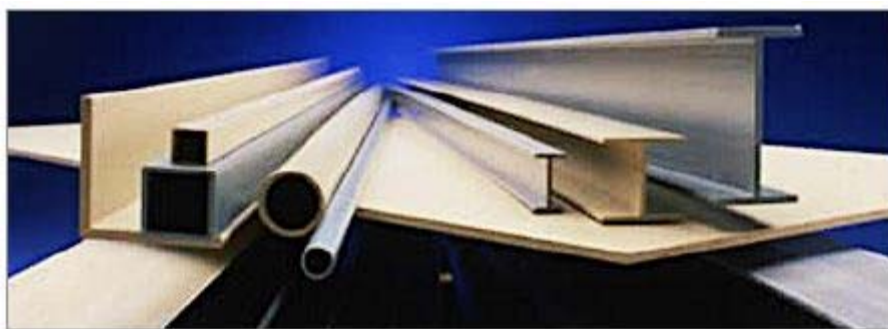


Figura 27. Secciones típicas de perfiles estructurales de GFRP (Pérez, M.A. (2006))

Una normativa estandarizada que indica las características de los elementos por pultrusión es la normativa europea EN 13706 (2002). Otro documento publicado por la asociación ACMA (American Composites Manufacturers Association) en 2001, indica las propiedades mecánicas de los perfiles de pultrusionados de FRP en función de las distintas direcciones de trabajo. En la Tabla 14 se muestran algunas de estas características comerciales de estos sistemas.

Tabla 14. Propiedades mecánicas de perfiles actuales de GFRP pultrusionados (Pérez, M.A. (2006)).

Propiedad	Dirección longitudinal	Dirección transversal
Resistencia a tracción (MPa)	200 - 500	50 - 80
Resistencia a compresión (MPa)	200 - 500	70 - 140
Resistencia a cortadura (MPa)	25 - 35	5 - 10
Módulo elástico (GPa)	20 - 40	3 - 4
Módulo a cortadura (GPa)	0,23 - 0,35	0,09 - 0,15
Coefficiente de Poisson		

La forma de actuación de los perfiles GFRP en situaciones de tensión y deformación elástica, es lineal hasta llegar la rotura dependiendo de la solicitud. En ensayos a compresión y a tracción sí es lineal, mientras que estado cortante no es así. La resistencia axial es elevada, a diferencia de su resistencia a flexión y su módulo de elasticidad que son menores, esta propiedad es un 15-20% inferior al módulo del acero [21].

3.11.3. *Aplicaciones de perfiles PRFP en ingeniería*

En 1980 se elaboran las primeras construcciones con materiales PFRP. Estas estructuras se emplean en edificios de una sola planta de altura destinados para laboratorios de ensayos con interferencias electromagnéticas, para revestimientos, para torres de enfriamiento, etc. Otra de las aplicaciones de los perfiles de PFRP que ha adquirido importancia en estos últimos veinte años, es la recuperación de estructuras y en particular de puentes. Estos materiales aportan grandes beneficios al sector del puente por los requerimientos de diseño, poco peso y durabilidad. De esta manera, en los años comprendidos entre 1970 y 1980, se elaboraron algunos puentes de carretera y peatonales con cubiertas de estos sistemas. Sin embargo, la fabricación de puentes formados íntegramente por materiales compuestos o sistemas híbridos, fue a finales de 1990 con el propósito de un menor coste, una durabilidad elevada, etc.

En lo referente a la normativa, a día de hoy no existe ningún reglamento para materiales, aunque hay algunas guías de diseño como el EUROCOMP Design Code and Handbook (1996) y la guía Italiana CNR-DT 205/2007 en Europa o el Structural Plastics Design Manual (ASCE, 1984) y el Pre-standard for LRFD of Pultruded FRP Structures (ASCE, 2010) en EE.UU. Asimismo, algunas empresas han redactado sus propias guías en las que incluyen los coeficientes de seguridad, el reglamento de diseño en componentes estructuras y sus conexiones.

a) Estructuras constituidas totalmente de FRP

Se trata de puentes que están compuestos totalmente por materiales compuestos. En algunos casos, los pilares y los estribos emplean materiales tradicionales. Estas estructuras muestran la diferencia entre los puentes tradicionales con el reemplazo de material y los primeros inicios a adoptar las propiedades de los FRP en la fabricación completa de los puentes.

Desde la década de los 80 se han construido puentes con la concepción de sustitución. Las primeras pasarelas de este tipo fueron en Estados Unidos con un perfil pultrusionado de tipo Strongwell y en Canadá, creative pultrusion, con una luz máxima de 25 metros. En la actualidad se han elaborado aproximadamente unas 200 pasarelas.

Una de las importantes aplicaciones de los FRP es en puentes para los peatones, en la que la parte principal de la estructura está elaborada con PFRP pilares y cimentaciones, con materiales convencionales. En el periodo de 1981 a 1982, se construyó el primer puente peatonal en Bulgaria. Constituido por GFRP y su matriz de resina, se empleó la

técnica de apilado manual de capas. A finales de 1982, se elaboró el puente vehicular de Miyun en Beijin, China. Este puente está elaborado con vigas tipo sándwich laminadas a mano con fibras de vidrio y resina de poliéster. En Escocia, Aberfeldy, una década después, se confecciono la primera pasarela más larga del mundo con unos 63 metros (Figura 20 a). Perfiles pultrusionados de fibra de vidrio fueron empleadas para la cubierta y las torres, y fibra de aramida para los tirantes del puente. Las uniones son adhesivas y solamente se utilizaron uniones mecánicas para láminas de conexión de los cables y las vigas. Este puente servía de unión entre las zonas de un campo de golf, permitiendo la circulación de transeúntes. El reforzamiento de estructura con fibra de carbono, posibilitó el paso de vehículos motorizados de tamaño pequeño utilizados para desplazar a los golfistas, Figura 28.

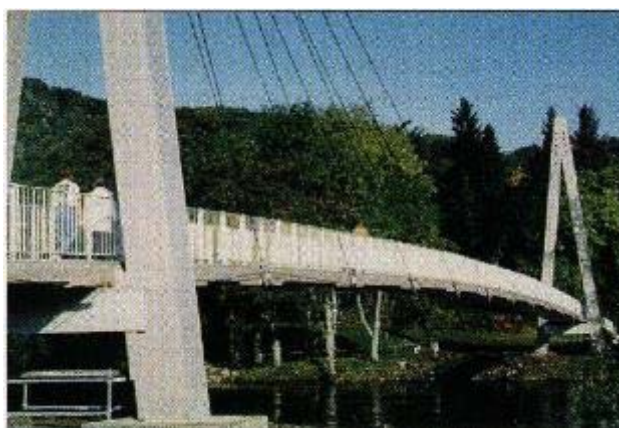


Figura 28. Pasarela de Aberferldy (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

Las fibras de vidrio presentan un bajo módulo de deformación. Esto supuso un problema en la estructura, ya que estaba sometida a una alta carga a flexión pudiendo ocasionar frecuencias naturales. Esto se solucionó con la adicción de material en la estructura (hormigón en ciertos tubos del puente) que permitió la separación de las frecuencias resonantes de flexión y torsión [11, 24].

Otra de la pasarela que empleó uniones atornilladas y adhesivas es la de Pontresina en Suiza a finales de 1997, Figura 29. Los adhesivos suponen una gran eficacia en materiales compuestos anisótropos que emplear uniones atornilladas. Esto permite una distribución uniforme de las cargas sin ocasionar concentración de tensiones. Sin embargo, este puente presenta conexiones atornilladas en los nudos por razones de seguridad. Estas uniones actuarán en caso de fallo de la resina.

Esta estructura únicamente se utiliza en invierno por lo que se monta y se desmonta cada año. Esta pasarela presenta una celosía de dos vanos de 12,5 metros de luz y un ancho de 1,5 metros.

El material empleado en esta estructura fue de material compuesto reforzado con fibra de vidrio. Estas fibras están ubicadas en la dirección longitudinal del material y en dispuestos en tejidos tipo manta. A esta pasarela se le administró aditivos que aportan resistencia a los rayos ultravioleta y a los agentes químicos de carácter atmosférico [11].



Figura 29. Pasarelas de Pontresina (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002).)

En el año 2001 se construyó un puente peatonal íntegramente formado por materiales compuestos en Lleida, España (Figura 30). Esta pasarela se encuentra por encima de las vías de un tren alta velocidad y conecta la carretera de Madrid con Barcelona. Los requerimientos para esta estructura fueron un montaje rápido, un mantenimiento mínimo y sin que se produzcan problemas electromagnéticos.

Las características de la pasarela son un tablero menor de 38 metros de luz y un ancho de 3 metros. Este tablero no transfiere a los apoyos las cargas de tipo horizontal. La forma de los dos arcos que conforman este puente es de tipo tubular. Dichos arcos están ubicados de manera inclinada con respecto al eje vertical debido a razones estructurales.

Los tirantes y los arcos tienen una forma hueca rectangular integrada por dos perfiles en U adheridos por platabandas encoladas. Las uniones verticales conectan los arcos con los tirantes y están constituidos por una doble T. En lo referente al forjado, se trata de vigas en doble T, ubicadas de manera transversal a una distancia de 0,6 metros cada una, y encima de ellas se encuentran los paneles que forman la zona de circulación, Figura 31.

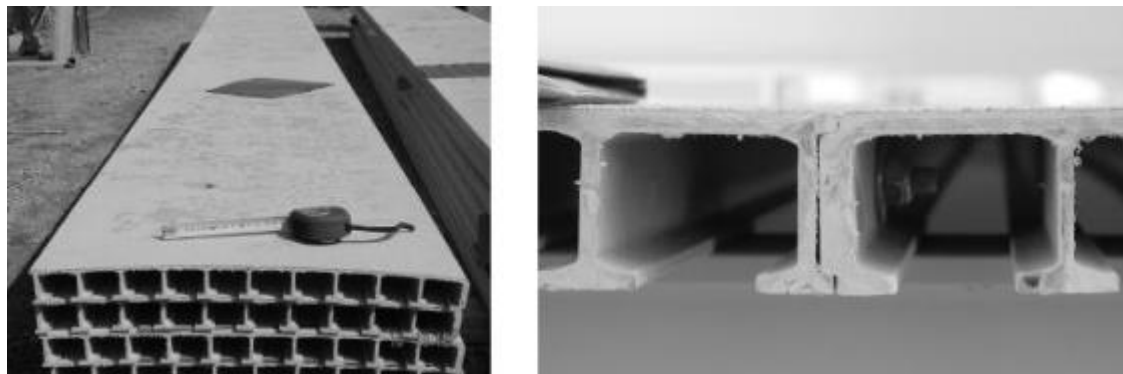


Figura 30. Vista lateral de la pasarela de Lérida finalizada: a) desde la rampa de acceso; b) desde el interior de la estructura (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))



Figura 31. Vista inferior del tablero de la pasarela (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

La pasarela de este puente estaba elaborada por perfiles de pultrusionados de fibra de vidrio. Estos paneles son unidireccionales que se encuentran unidos con una chapa de espesor 0,5 cm en la parte superior (Figura 33). Fueron transportados de Dinamarca con un ancho de 0,5 cm y 2,5 m de largo.



a)

b)

Figura 32. Paneles pultrusionados de fibra de vidrio que conforman la superficie de tránsito del tablero: a) acopio en obra; b) ensamblaje transversal (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

El arco se puede desdoblar en la región de apoyo para minimizar las deformaciones en sentido horizontal ocasionadas por el viento transversal como se muestran en la Figura 34.

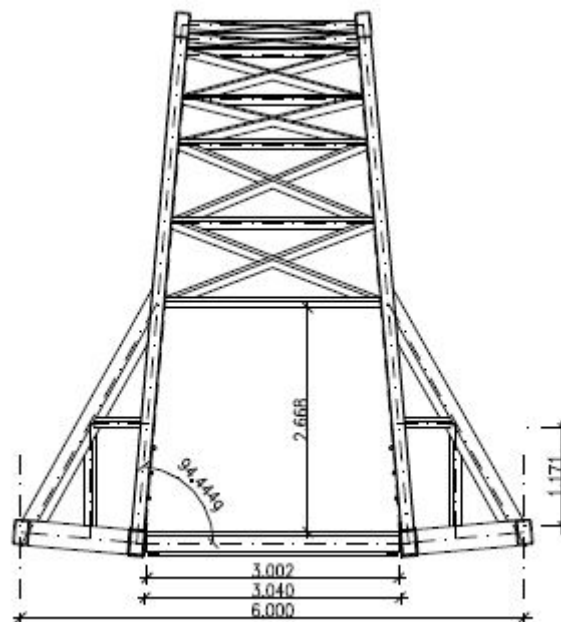


Figura 33. Vista frontal lateral de la pasarela (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

La longitud máxima de todos los elementos es de 9 metros por razones de transporte, de forma que se efectúan conexiones con tornillos de acero inoxidable entre los arcos y tirantes con los otros componentes que conforman la infraestructura (Figura 34).



a)



b)

Figura 34. Conexiones: a) Chapas de acero inoxidable empleadas en las conexiones entre perfiles; b) uniones entre los perfiles del arco y arriostramientos (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

Elementos de hormigón armado son los materiales que configuran las rampas de acceso a este puente. Se trata de una viga de sección transversal de tipo trapecial maciza, colocada en fustes de área circular excepto en la zona de los extremos, encajada a torsión. Las rampas presentan una pendiente del 8% que aseguran el acceso a la pasarela (Figuras 35 y 36) [11].



Figura 35. Vista lateral de la rampa de acceso a la pasarela (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))



Figura 36. Vista frontal de la rampa de acceso (G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002))

b) Estructuras híbridas

Los inconvenientes que presentan los FRP provocan que los ingenieros no se muestren seguros a la hora de emplear estos materiales en las obras. De este modo, las estructuras híbridas, compuestas por materiales tradicionales y elementos de FRP, últimamente han ganado importancia para su uso en obras de nueva fabricación. En la comunidad de científicos procedentes de Europa, Estados Unidos, Brasil, China, Corea del Sur y Japón han mostrado su interés en estas estructuras.

Los sistemas híbridos para que se puedan aplicar de forma triunfante en estructuras de la ingeniería civil, deben atender a una serie de recomendaciones. Estos materiales tienen que presentar una elevada calidad y rendimiento.

Las ventajas que proporcionan los FRP frente a las armaduras de acero son la resistencia a corrosión de las sales de deshielo. El peso que tienen siendo aproximadamente un 20% menor que un tablero con materiales tradicionales, lo que permite que la instalación sea en un tiempo corto y afectando en de forma mínima el tráfico.

En España el primer puente híbrido fue construido en el año 2004 por el grupo Acciona. Las vigas compuestas polímeros armados con fibras de carbono y el tablero de hormigón armado, Figura 37. Esta estructura se encuentra ubicada por encima de una carretera de cuatro carriles, la longitud del puente es de 46 metros y fue elaborado para tolerar 60 toneladas de tráfico. Las vigas están formadas por estructuras tipo sándwich con fibra de carbono con una zona hueca. Esa área se colocó espuma de poliuretano y se confeccionó con resina epoxi y fibras de carbono de tipo unidireccional y

multidireccional. Estas vigas aguantan la cubierta de la carretera que está constituida por asfalto y hormigón. El tiempo empleado para la instalación de las vigas y del hormigonado de la cubierta fue inferior a los dos días [24].



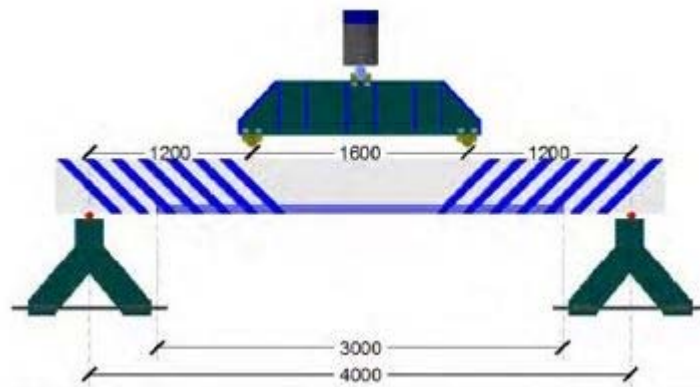
Figura 37. Primer puente en España construido con materiales compuestos en 2004 (Sánchez, C.; Ruiz, J. M. (2017))

3.11.4. Campos de aplicación

a) Refuerzo a flexión

Las vigas, muros, losas y otros elementos que se encuentran sometidos a flexión, una de las opciones más adecuadas para reforzar la resistencia a flexión es el empleo de laminados. El límite a flexión que pueden alcanzar estos elementos reforzados, pretensados y postensados es de 50%. Las fibras utilizadas son las de tipo carbono dispuestas longitudinalmente en el material, actuando de igual forma que un refuerzo de acero (Figura 38 b).

El campo de aplicación de este refuerzo es en muros de hormigón o mampostería, elevando la resistencia a carga fuera del plano, cargas de viento, presión del suelo, presión de fluidos en tanques y voladuras. Es posible su colocación en la zona opuesta de manera que se aumente su capacidad portante. Los FRP en muros se disponen en dirección longitudinal, permitiendo la resistencia de seísmos, del viento, etc., mientras que en vertical, soporta los esfuerzos gravitacionales. Los tejidos posicionados en la cruz de San Andrés proporcionan capacidad portante permitiendo soportar los distintos esfuerzos mencionados previamente.



a)



b)



c)

Figura 38. Esquema e imágenes del ensayo de una biapoyada reforzada con FR: a) viga sometida a carga; b) ensayo a flexión y c) ensayo cortante (Pérez, M.A. (2006))

b) Refuerzo a cortante

Otra de la característica de los laminados es su resistencia a cortante de forma que se puede aplicar en vigas, pilares y otras estructuras de hormigón. Empleado un refuerzo de este tipo de forma correcta es posible aumentar la capacidad de conexión de los elementos unidos, elevando así su ductilidad. La colocación del laminado es inclinada respecto a la dirección longitudinal (Figura 38 c).

La colocación de laminados en los pilares aporta de manera adicional resistencia cortante en situaciones de fluencia y retracción de los materiales, ocasionados por seísmos o por el viento. El perfil en "U" proporciona una elevada resistencia cortante en situaciones que producen este tipo de esfuerzos, Figura 39 [21].



Figura 39. Distintos tipos de aplicación de refuerzo cortante (Pérez, M.A. (2006))

3.11.5. TIPOS DE UNIONES

En general, los sistemas formados por materiales compuestos precisan de componentes de distinta índole para la construcción de cualquier estructura rígida. La selección de las uniones dependerá del tipo de estructura que se trate, las cargas mecánicas que han de soportar, la naturaleza de los materiales a relacionar, los aspectos económicos, etc. En función de estas características, las conexiones se pueden clasificar en dos grupos:

- **Mecánicas mediante tornillos.** Los elementos que se emplean para realizar la conexión suelen ser tornillos, remaches, bulones, etc. Requiere de estructuras auxiliares para conectar los componentes del ensamblaje y se trata de la conexión más empleada.
- **Adhesivo.** En este caso no se realiza ninguna perforación en el material, ya que la unión se realiza a través de algún adhesivo. En este método, en comparación con el anterior, se produce un reparto de cargas a lo largo del adhesivo y no añade peso a la estructura. Para un correcto funcionamiento, la superficie se debe acondicionar antes de efectuar la conexión, requieren de una supervisión posterior para evitar el despegue, ya que pueden deteriorarse por las condiciones ambientales (temperatura y humedad) y por esfuerzos de delaminación.

Uniones mecánicas mediante tornillos

La colocación de estos elementos es sencilla y es posible que el personal relacionado con el mundo del acero y hormigón, sepan cómo operar. No es preciso realizar ningún proceso de previo de adecuación de la superficie. Establecidas las uniones en la

estructura, éstas alcanzan su nivel máximo de resistencia y rigidez. En el caso de se produzca algún defecto en la unión, no se necesita procedimientos ni operarios especializados. A pesar de todos estos beneficios, estas uniones presentan ciertos inconvenientes. En las zonas donde se realizan los agujeros, las propiedades del material pueden verse afectadas, se produce una creación de tensiones y una disminución de la superficie de la estructura, de manera que se pierde efectividad en la conexión. Esto es debido a las características anisótropas de los materiales compuestos. Además, esas regiones sufren degradación por la introducción de agentes químicos y humedad.

A lo largo de los años, se han realizado varias investigaciones acerca de las uniones mecánicas. Existen algunas sugerencias acerca de su geometría y diseño pero aún hay una normativa que concentre todos estos datos. A pesar de esta falta de normativa, lo que sí está claro son los modos de rotura de estos sistemas:

- **Bearing failure.** Se caracteriza por ser un fallo dúctil de forma local y despegue de material en la región de contacto. Puede ocasionar rotura de la lámina desde la zona del orificio hasta el final de la misma por movimiento en la dirección longitudinal de la carga.
- **Net-section failure.** Es el tipo menos habitual porque la región alrededor del agujero se encuentra debilitada por las altas cargas a tracción que tiene que soportar el material en la dirección del esfuerzo.
- **Shear-out failure.** La rotura se efectúa en la dirección del esfuerzo de tipo cortante. Es de los más habituales junto con la primera forma de fallo y es importante considerarlo en la etapa de diseño del material.
- **Cleavage failure.** Consisten en la fractura del material en dos sentidos, suele ser un modo de rotura poco común y es posible evitarlo con un aumento de la distancia libre en el extremo.

En la Figura 40 se aprecia los distintos modos de rotura del material, siendo el de tipo por aplastamiento el que ocasiona daño débil al sistema y aporta una elevada resistencia. En el resto de casos, el fallo es mayor y es importante impedir que se produzcan de forma que se tiene que estudiar las propiedades de la estructura y la geometría de las uniones que se van a emplear [4].

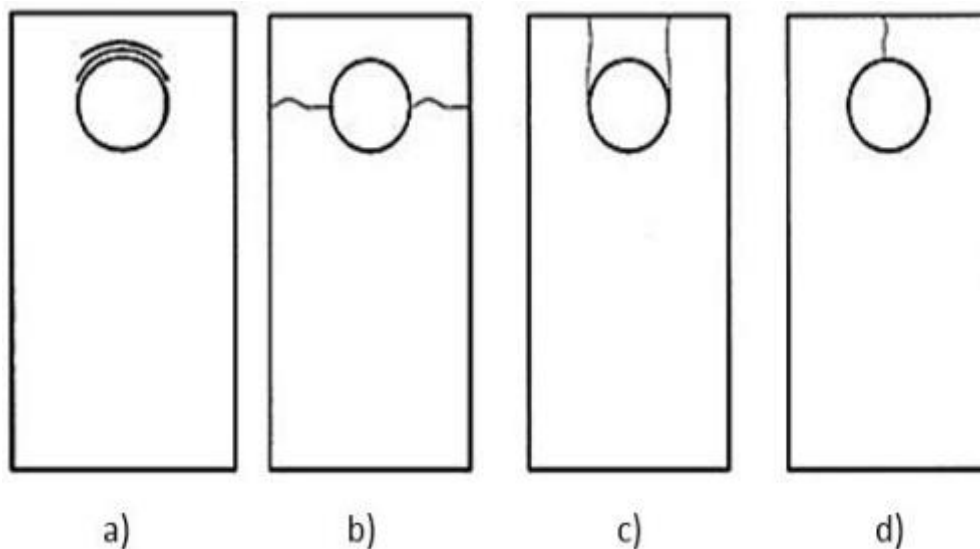


Figura 40. Modos de fallo a) Aplastamiento b) Net-section, c) Desgarre, d) Cleavage
(Bank, L. C. (2007))

Comportamiento de la unión con adhesivo.

Los ensayos de adherencia permiten conocer el comportamiento adherente entre el FRP y el adhesivo. En la Figura 40 se observa un experimento a cortante. Para niveles de esfuerzos pequeños, las tensiones de carácter tangencial se agrupan próximas a las zonas cargadas. Sin embargo, estos esfuerzos se desplazan al extremo no cargado a medida que se aumenta la carga.

El comportamiento adherente se puede definir a partir de la tensión cortante y el desplazamiento. La transmisión del esfuerzo tangencial se realiza a través de la deformación del adhesivo, y se realiza un movimiento relativo entre el FRP y el hormigón.

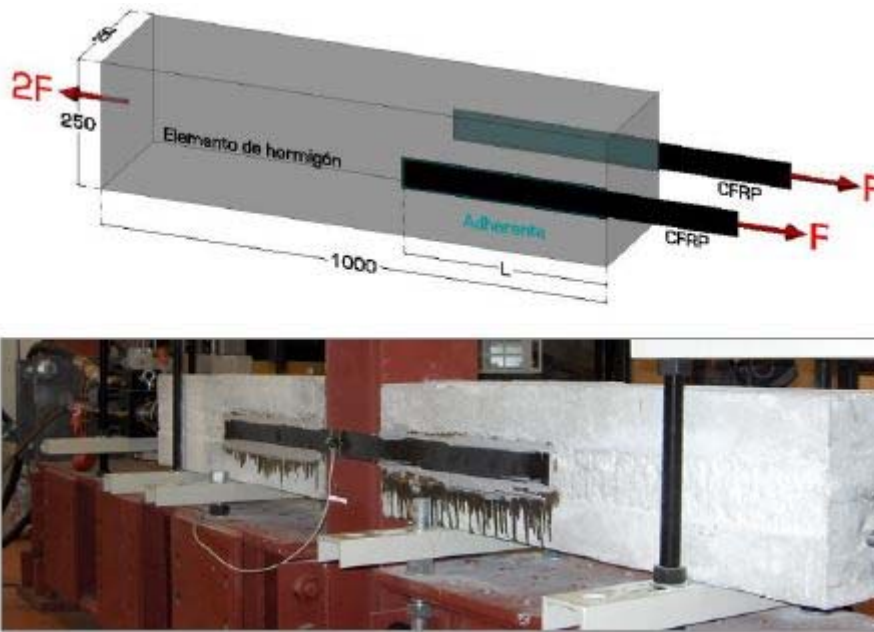


Figura 40. Esquema e imagen del ensayo de doble cortante para determinar el comportamiento adherente entre el FRP y el hormigón (Bank, L. C. (2007))

3.12. VENTAJAS E INCOVENIENTES

En los últimos años, el empleo de los materiales compuestos es cada vez mayor en la rehabilitación de estructuras antiguas como puentes o edificios.

- Estos materiales son ligeros, su densidad se encuentra entre 1,5 y 2,5 g/cm³ a diferencia de la densidad del acero 7,85 g/cm³. Esto facilita su puesta en obra, su transporte su instalación sin aumentar el peso de la infraestructura. Además, no hace falta una mano de obra especializada.
- En situaciones de carga cíclica tiene un buen comportamiento a fatiga a diferencia de los materiales metálicos que su resistencia decrece de forma rápida.
- Presentan resistencia a la corrosión, a los ambientes de carácter agresivo y agentes químicos.
- La longitud de estos materiales no está limitada, por lo que se puede cortar en la obra la medida requerida sin necesidad de utilizar empalmes como las chapas de acero.

En algunas ocasiones, la aplicación de estos materiales está condicionada por las desventajas que presentan.

- El elevado coste de los componentes es uno de los principales inconvenientes, aunque queda contrarrestado con la necesidad de emplear una maquinaria de menos costosa, menor mano de obra para su preparación y colocación.
- Estos sistemas unidos a la superficie exterior del hormigón unido con resina epoxi, es necesario que acondicionar el área de contacto de forma para una correcta posición. En el caso de que esto no se efectúe de manera adecuada, se crean grietas en los refuerzos por la concentración de tensiones.
- Las láminas de FRP no se tienen que doblar, lo que limita su utilización en zonas con cambios de dirección. Una alternativa es emplear tejidos de fibra con carbono se pueden moldear.
- Otro problema es la pérdida de material en situaciones de esfuerzo a flexión y cortante. La estructura se vuelve débil y presenta fallos en circunstancias de baja carga.
- En lo referente a la fibra de carbono, su resistencia a rotura es baja por lo que se limita su uso en condiciones que requiere elevada ductilidad.
- La resistencia al fuego es limitada, los FRP no toleran temperaturas que se encuentran por encima de los 80°C y se desprende del acero. Este asunto se está estudiando con el fin de mejorar las propiedades de los materiales compuestos.
- El estudio de estos materiales aún no se ha desarrollado de forma completa, ya que los cálculos de los procedimientos se fundamentan en hipótesis simplificadas y la falta de experimentación. La escasa normativa que hay acerca de estos sistemas hace que muchos bastantes técnicos de la ingeniería civil desconfíen del comportamiento de estos los FRP [7].

4. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

4.1. ASPECTOS ECONÓMICOS

En la evaluación económica de cualquier obra en el ámbito civil, se consideran todos los costes asociados al ciclo de vida de la infraestructura: definición del proyecto, ejecución, mantenimiento y desmantelamiento.

El empleo de materiales compuestos en ingeniería civil supone un alto coste económico inicial en comparación con los materiales convencionales, acero y hormigón. Las propiedades que presentan estos materiales, hacen que sean más competitivos en estructuras civiles, lo cual produce una reducción económica de la ejecución de la infraestructura.

Estos sistemas al presentar una densidad baja, facilitan su transporte y no necesitan de equipos de gran magnitud para su puesta en obra. Su resistencia a la corrosión y al medio ambiente supone un ahorro económico en las fases de mantenimiento y conservación de la estructura. El tiempo de ejecución de la obra es menor, se trata de estructuras prefabricadas por lo que la cantidad de materiales empleados es menor. En situaciones que requieren un tiempo limitado para la realización de la obra, los materiales compuestos suponen un gran beneficio. En la Tabla 15 se encuentran algunos de los gastos económicos de algunos refuerzos con recrecidos de hormigón, materiales metálicos y CFRP, según la bases de datos Cype ingenieros [9].

Tabla 15. Precios extraídos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros (González, V., Barrios Padura, Á. y Molina Huelva, M., 2017)

TIPO REFUERZO	DESCRIPCIÓN UNIDAD	COSTES (€)
RECRECIDOS DE HORMIGÓN	m ³ Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	98,69
	m ³ Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón proyectado.	101,42
	m ³ Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	43,93
	m ³ Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	19,37
ELEMENTOS METÁLICOS	m ³ Refuerzo de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos empresillados.	62,37
	Ud. Refuerzo de base y capitel de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos.	104,98
	m ³ Refuerzo de viga o vigueta de hormigón armado, con perfiles metálicos.	15,57
CFRP	m ³ Refuerzo de muro o pilar de hormigón armado, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	42,14
	m ² Zunchado de pilar de hormigón armado, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29
	m ³ Refuerzo de vigas y viguetas, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	41,59
	m ² Refuerzo a cortante de vigas, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29

Además, los costes de producción de varias estructuras son menores en comparación con la fabricación de un único producto. En Australia se llevó a cabo un análisis comparativo relacionado con la sustitución de puentes de madera que se encontraban en un estado de deterioro. Se consideró emplear materiales tradicionales (hormigón reforzado) y la fabricación de las estructuras con FRP. En la Figura 41 se puede observar la comparación de costes de ambas opciones y se muestra la viabilidad económica de los materiales compuestos. Esto es debido a sus elevadas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, etc., que contrarrestan con los inconvenientes que presentan. Elevado coste inicial, escasas estructuras estandarizadas y personal poco cualificado.

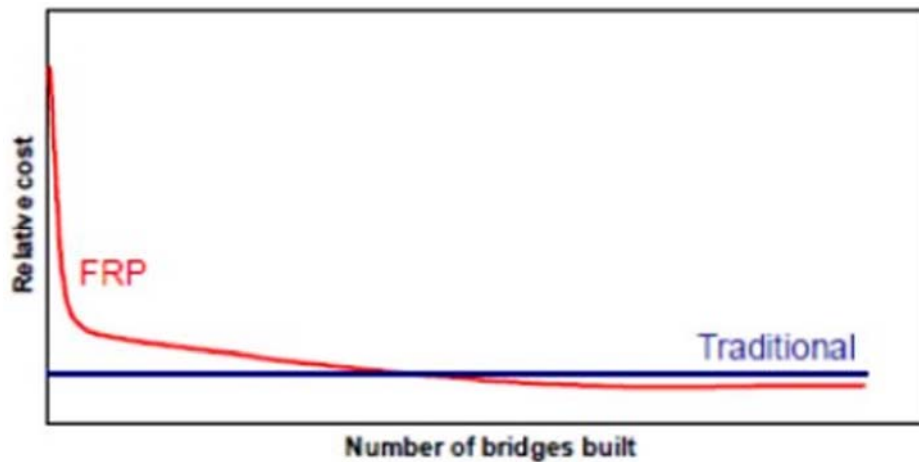


Figura 41. Comparación de los costes económicos de puentes con FRP y puentes tradicionales (Sánchez, C., y Ruiz, J. M. (2017))

4.2. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

La Declaración Ambiental de Producto (DAP) es un informe que indica el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida de acuerdo a las normas internacionales de referencia. Se trata de un informe objetivo, verificable y preciso.

La evaluación de todos los impactos positivos y negativos de un servicio sobre el medio ambiente se realiza a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este análisis se basa en la evaluación del empleo de recursos energéticos, hídricos y naturales, las emisiones que se desprenden a la tierra y al agua y la generación de residuos en cada fase del ciclo de vida. En ingeniería civil los impactos sobre el medio ambiente son el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la acidificación, la eutrofización, la formación de fotoquímica de ozono y el agotamiento de los recursos abióticos.

En los últimos años, esta metodología cada vez es más frecuente y puede ser una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones. Permite una planificación estratégica, estudiar los distintos procedimientos, conseguir un producto con mejores prestaciones o puede utilizarse como un instrumento de marketing, Figura 42.



Figura 42. Análisis del ciclo de vida (Aragón, A (2016))

En construcción existen 3 tipos de etiquetas ecológicas:

- Tipo I Ecoetiqueta, Certifican que ciertos productos o servicios tiene un impacto menor sobre el medio ambiente. Es de carácter voluntario.
- Tipo II Auto-declaración, Realizada principalmente por los fabricantes, importadores, distribuidores o cualquier otro que se pueda beneficiar.
- Tipo III Declaración Ambiental, Estas etiquetas son las más rigurosas, ya los datos ambientales están cuantificados por las normas ISO 14040.

Este método de análisis se inicia debido a la crisis del petróleo y la insuficiencia de las energías en los años sesenta. Empresas de Europa y Estados Unidos emplean este análisis para evaluar el consumo energético de los métodos de fabricación de productos derivados de estas energías. La Sociedad de Toxicología Química Ambiental (SETAC) publica en 1993 el Código de Practicas de ACV tras realizar distintas investigaciones. Esto produce un cambio en la ejecución de los proyectos, ya que se empieza a promover y concienciar la fabricación de elementos más sostenibles. En 1997 la Organización Internacional de Estandarización elabora las normas ISO 14000 para la gestión

ambiental. La norma ISO 14040 indica las fases para la elaboración de un Análisis de Ciclo de Vida como se indica en la Figura 43 [3,12].

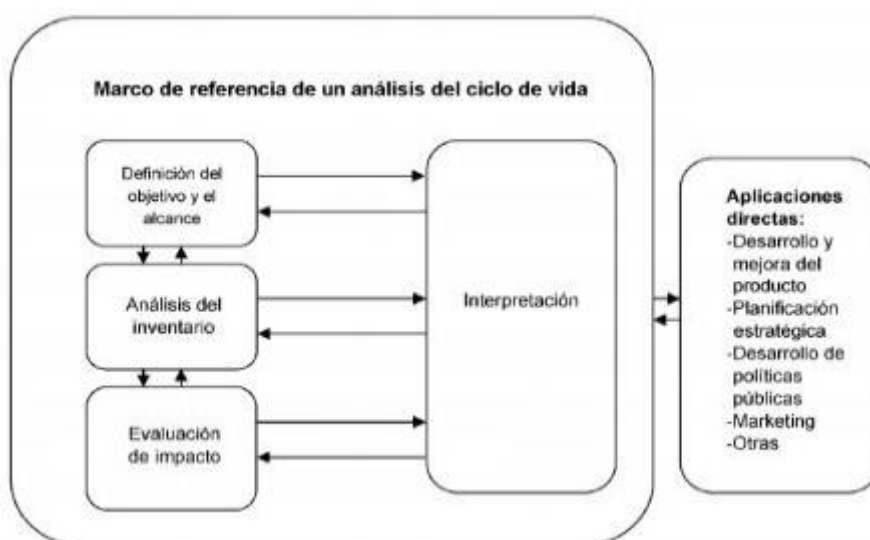


Figura 43. Fases Análisis del Ciclo de Vida (ISO 14040)

En la construcción hay pocos datos de la Declaración Ambiental del Producto de los FRP, por lo que se este análisis se realiza en función del consumo de energía desde la etapa de fabricación del material hasta el reciclado y tratamiento de los residuos. En la Tabla 16 y 17 se encuentran los valores de la energía consumida por kg de material, para la extracción y en la fabricación de los FRP respectivamente [9].

Tabla 16. Energía de extracción de los elementos que forman los materiales compuestos (González, V., Barrios Padura, Á. y Molina Huelva, M. ,2017)

Materiales	Energía consumida (MJ/kg)
Polímeros	
Poliéster	60-78
Epoxi	76-80
LDPE	65-92
PP	72-112

PVC	53-80
PS	71-118
Fibras	
Vidrio	13-32
Carbono	183-286
Metales	
Aluminio	196-257
Acero	30-60
Acero inoxidable	95-115
Acero de fundición	67-260
Cobre	95-115
Zinc	67-260

En esta tabla se puede apreciar que los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono a pesar de la alta resistencia mecánica que presentan y resistencia a la corrosión en ambientes húmedos y agresivos, son energéticamente desfavorables. La energía de extracción de estos elementos se encuentra entre los 183 y 286 MJ/kg [9].

Tabla 17. *Energía adicional para la fabricación de los materiales compuestos*
(González, V.; Barrios, A. y Molina, M. (2017))

Métodos de fabricación	Energía consumida (MJ/kg)
Moldeo en autoclave	21.9
Moldeo por inyección	19
Moldeo por transferencia de resina	12.8
Moldeo por infusión de resina asistida por vacío	10.2
Presión en frío	11.8
Pultrusión	3.1

De los métodos de fabricación el que menos energía consume es la pultrusión (3.1 MJ/kg). El moldeo por autoclave presenta la desventaja de ser uno de los procesos de fabricación que mayor energía consume. Sin embargo, los elementos estructurales que

se obtiene por este método presentan una reducción de peso entre el 60% y el 80% frente al acero, lo que aporta una ventaja significativa a la hora de transportar estos productos.

El consumo de gasolina y la cantidad de energía desprendida por la combustión sirve para calcular el consumo energético en el proceso de transporte. De acuerdo con los datos del CIEMAT, el consumo es de 0,073 l/km (0,0624 kg/km), el poder calorífico es de 42,9 MJ/kg y el peso máximo que puede transportar un vehículo de 489 kg es el 80% de su peso. El cálculo de la ecuación (2) muestra la energía necesaria para desplazar un 1kg de material de CFRP.

$$\frac{42.9 \frac{MJ}{kg} \times 0.0624 \frac{kg}{km}}{0.8 \times 489 kg} = 6.85 \cdot 10^{-3} \frac{MJ}{kg \times km} \quad (2)$$

Comparando este valor con el coste energético para transportar acero, $34.22 \cdot 10^{-3}$ MJ/kg, se puede apreciar las ventajas que presentan los materiales compuestos en relación a su bajo peso [9].

4.3. RECICLAJE

En la fase final de la vida de un producto es importante contemplar la posibilidad que presentan para el reciclaje. Para que la fase de reciclado sea eficiente es necesario una preparación de los desechos. Esto se basa en la recolección, transporte, identificación y separación de los componentes no deseados. Posteriormente se separa la matriz y de las fibras, y finalmente, se fabrican nuevos compuestos con las fibras de carbón recicladas. En las fibras de carbono supone una gran ventaja debido a la alta cantidad de energía que necesitan y al elevado coste de fabricación.

Las técnicas de reciclado en estos materiales pueden ser mediante tratamiento mecánico, químico y térmico.

Tratamiento mecánico: la molienda del material permite reducir los desechos y separarlos en dos fracciones: polvo de resina y fibras. Los materiales recuperados después esta separación mecánica, se pueden emplear como relleno. Existen otros rellenos de carácter virgen a un precio más barato (carbonato de calcio o sílica) lo que hace que no sea viable desde el punto comercial. Otra opción es en la aplicación de refuerzo cuyo contenido está limitado a un 10% en peso. Esta limitación es debido a la

deterioración de las propiedades mecánicas que presenta el material reciclado, además, pueden empeorar como consecuencia de la alta viscosidad del material compuesto. Como alternativa se utilizan como fuente de energía por el alto componente de resina orgánica.

4.3.1. Tratamiento térmico: variantes de pirólisis

El proceso de pirólisis opera en un rango de temperatura entre 450°C y 600°C dependiendo del tipo de resina y de la atmosfera. Las temperaturas altas en termoplásticos de alto rendimiento o epoxi mientras que las bajas, en resinas de poliéster. Los principales productos que se obtiene con esta técnica son fibras y rellenos. En general este tratamiento requiere una pequeña cantidad de oxígeno para reducir el tiempo de trabajo. La degradación térmica produce compuestos gaseosos, resinas con un peso molecular inferior al de partida y aceites que se pueden recuperar como productos químicos. Las propiedades mecánicas finales de las fibras dependen de las condiciones de trabajo. La resistencia a tracción se reduce entre 4% y 85%, en las fibras de carbón y entre un 52% y 64%, en las de vidrio. El límite de temperatura en las fibras de carbono de tipo comercial es de 500°C-550°C. En el caso de las fibras de vidrio estas temperaturas producen una pérdida de las propiedades mecánicas por lo que es necesario realizar un tratamiento posterior.

a) Pirólisis de transportador de cadena

En este tipo el material compuesto se trasporta hasta un horno con una temperatura y una atmósfera controlada. Con este método, las fibras de carbono pueden mantener sus propiedades mecánicas hasta un 90%.

b) Pirólisis de lecho fluido

Se basa en un calentamiento rápido de los materiales tamaño reducido en un lecho de arena con una corriente de aire caliente. Este calentamiento produce una degradación de la resina y una liberación de las fibras. Se puede emplear en materiales mixtos, contaminados, con superficies pintadas, núcleos de espuma o con elementos metálicos. Las fibras de carbono recuperadas con este proceso presentan más daños que con la pirólisis convencional y una reducción del 25% de su resistencia.

c) Pirólisis asistida por microondas

Al igual que el proceso anterior, el material se calienta de forma rápida lo que permite un ahorro de energía importante. Este proceso ha sido probado en distintas universidades pero aún no se comercializa con éxito.

4.3.2. *Tratamiento termoquímico*

Consiste en la adicción de un solvente a altas temperaturas de manera que produce la rotura de la resina se en productos con menor peso molecular. Las fibras de vidrio en estas condiciones sufren un proceso de degradación a diferencia de las de tipo de carbono, que se liberan de la resina. Los factores que influyen en este proceso son la temperatura, la presión, el tipo de solvente y catalizador. La temperatura crítica en este tratamiento es de 350°C, inferior a la proceso de pirolisis. El agua es solvente más empleado, sin embargo a temperaturas inferiores a la crítica es posible emplear etanol, el metanol, propanol y la acetona, así como sus mezclas con el agua. Los catalizadores se emplean para mejorar las condiciones de trabajo, no obstante, puede deteriorar las propiedades mecánicas de la fibra y pueden perjudicar la salud de los trabajadores. Hay que tener en cuenta que el empleo de agua en esta técnica puede producir corrosión.

Estos procesos de reciclaje no son iguales en términos de energía requerida. La principal fuente de energía en los procesos de fabricación y reciclaje es la energía eléctrica.

Disminuir este requerimiento de energía es esencial para disminuir el daño producido por estos métodos e incluso para mejorar la sostenibilidad del proceso. En Figura 44 se puede observar la energía necesaria para cada tipo de método [15].

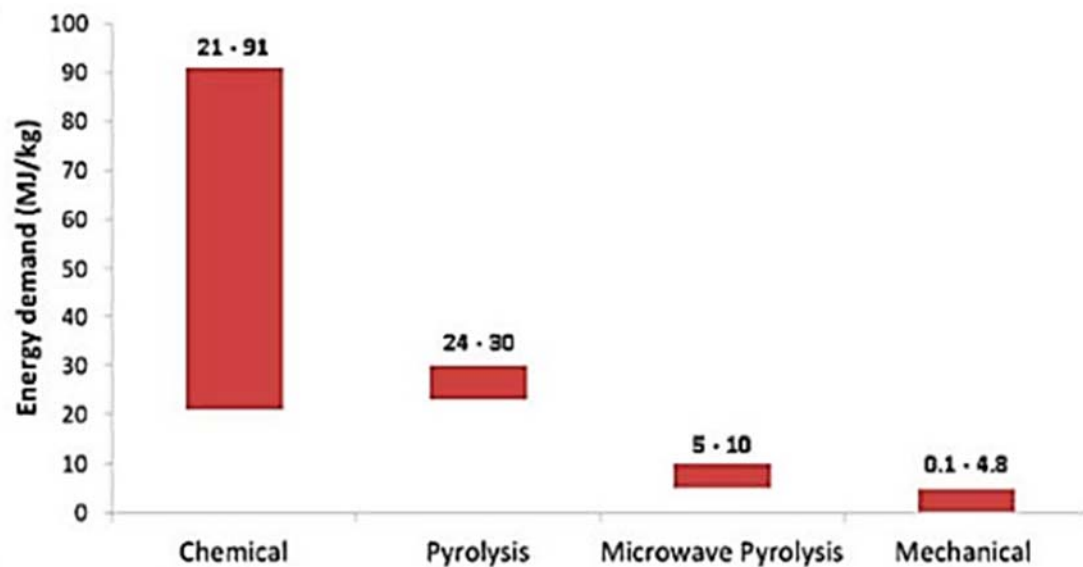


Figura 44. Energía necesaria para la realización de los distintos métodos de reciclaje en materiales compuestos (Job, S.; Leeke, G.; Tarisai, P.; Oliveux, G.; Pickering, S. y Aizat, N. (2016))

En el reciclaje mecánico la energía depende del rendimiento del proceso, siendo el valor más bajo cuando la máquina opera a la máxima capacidad.

Algunos procesos de reciclaje se pueden emplear para generar energía y materiales utilizables. La incineración de las fibras de vidrio en un horno de cemento permite la recuperación de la energía. En la producción de cemento se puede usar como materia prima los elementos incombustibles: las fibras de vidrio y el relleno.

Los compuestos de fibras de carbono se pueden reciclar mediante procesos químicos y pirólisis. El proceso más eficiente dentro de la pirolisis es la empleada con microondas a diferencia de la pirolisis convencional. Esto es debido a que el calentamiento se realiza de forma rápida y de manera selectiva. Los subproductos orgánicos se pueden emplear para recuperar energía o como materia prima. Los procesos de síntesis y recuperación, por el contrario, pueden aumentar la energía necesaria para el proceso.

En general, la energía requerida para los procesos de reciclaje es menor que la energía empleada para la producción de las fibras vírgenes de tipo de vidrio y carbono, Figura 45 [15].

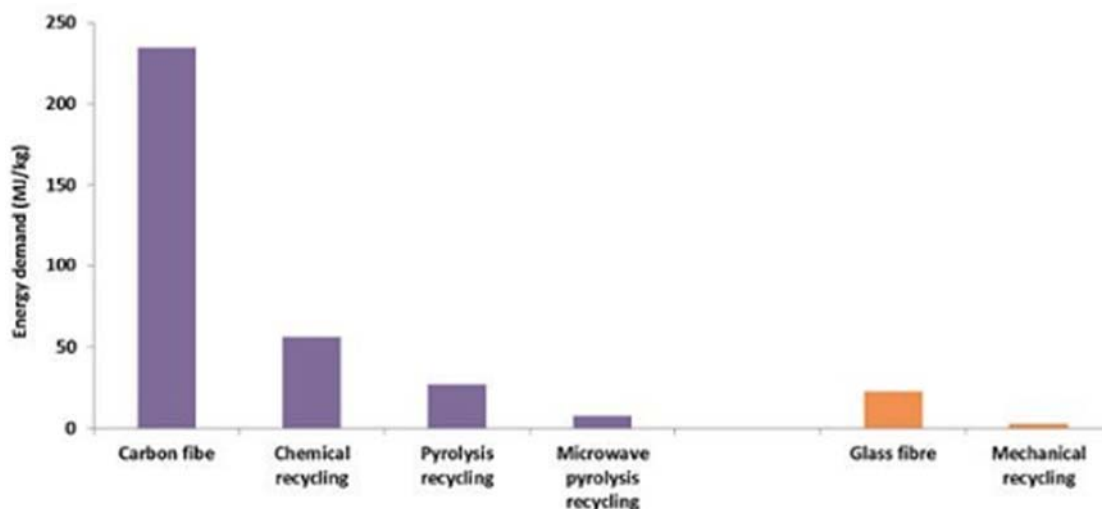


Figura 45. Comparación de energía empleada en la fabricación de fibras de vidrio y carbono y sus distintos procesos de reciclaje (Job, S.; Leeke, G.; Tarisai, P.; Oliveux, G.; Pickering, S. y Aizat, N. (2016))

4.4. LÍNEAS FUTURAS

En los últimos años se han realizado múltiples estudios de investigación de los materiales compuestos por los beneficios que estos aportan en diversas áreas de la industria. Sin embargo, estos materiales no han alcanzado su total desarrollo en todos sus sectores, puesto que aún se siguen estudiando temas como el procedimiento y el desarrollo de modelos de fallo, la estimación de la resistencia y, sobre todo, la búsqueda de formas adaptadas a las propiedades de los materiales, así como los sistemas de conexión y de ejecución específicos.

El modo de actuación de estos materiales ante exigencias mecánicas extremas, con especial atención en el fallo por impacto, está evolucionando considerablemente gracias al modelado y la simulación numérica. Esto permite desarrollar técnicas estandarizadas de determinación de las propiedades mecánicas, métodos de ensayos no destructivos, localización de defectos interlaminares, empleo de sensores de tipo rejilla de Bragg para la detección de posibles anomalías estructurales y la optimización de los procesos de producción.

En las áreas de edificación e ingeniería civil, se están estudiando nuevas aportaciones de los materiales compuestos, ya que estos se emplean como elemento reforzante y materiales estructurales.

Las características del adhesivo influyen también en el comportamiento de estas estructuras compuestas. Es importante desarrollar adhesivos que al distorsionarse posibiliten el transporte las cargas del hormigón al laminado a través del área de contacto. Del mismo modo que tenga capacidad de tolerar la formación de grietas intermedias originadas por el mecanismo de flexión en las estructuras de hormigón sin que se produzca una separación entre los elementos, como ocurre con las barras de acero en hormigón armado. Además, los adhesivos tienen que perfeccionar sus propiedades de durabilidad y su comportamiento frente al fuego.

Una alternativa de los adhesivos es emplear materiales NSM (Near Surface Mounted), ya que su rendimiento es superior a la de los aglutinantes. No obstante, el inconveniente más significativo de estos materiales es la formación de fisuras. Los estudios futuros se centrarán en estos problemas y en las aplicaciones.

Otro campo de investigación que está abierto son los refuerzos mixtos. El desafío se encuentra en reemplazar el perfil de acero por uno de materiales compuestos, principalmente en la unión de la configuración existente con la estructura de compuesto. A día de hoy esta opción no es una solución productiva. Las infraestructuras reforzadas con tejidos confieren más beneficios que la utilización de laminados multidireccionales. Resolver los inconvenientes que tienen los laminados es esencial debido alto grado de aplicación de estos sistemas [21].

5. CONCLUSIONES

La utilización de los materiales compuestos cada vez es mayor en la rehabilitación o reparación de estructuras antigua como puentes o edificios. Se trata de elementos ligeros, con elevadas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, y que no requiere de mano de obra especializada, lo que facilita su puesta en obra y reduce los tiempos de instalación. El precio inicial es elevado en comparación con otros materiales convencionales, aunque en la mayoría de los casos, no se tiene en cuenta los costes del ciclo de vida de la estructura. Esto hace que los materiales compuestos sean beneficiosos.

A pesar de todas las ventajas, la falta de normativa de los FRP hace que muchos técnicos desconfíen en el comportamiento de estos materiales. En los últimos años, se están realizando investigaciones a nivel mundial de sobre estos elementos. Los estudios se están centrando en las uniones adhesivas, en estados de tensión límite, en nuevas geométricas donde se aprovechen al máximo las propiedades mecánicas que presentan.



6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACI 440.2R-08. Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures.
- [2] Águila Higuero, V. (2010). Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: Vidrio, carbono y aramida.
- [3] Aragón, A (2016). Declaraciones Ambientales de Producto Aislamiento Sostenible. Consultado el 13 de abril de 2018 de <http://www.isoverblog.es/destacando-productos-con-las-declaraciones-ambientales-dap/>
- [4] Bank, L. C. (2007). Composites for construction: Structural design with FRP materials.
- [5] Cabrera, F. M. (2004). Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles. Técnica industrial, 254.
- [6] Chawla, K. K. (1998). Ceramic matrix composites. Composite materials. Springer.
- [7] Dueñas, J. A. (2015). Reforzamiento de estructuras con FRP (Fiber reinforced polymers), aplicación al caso de refuerzo a flexión de vigas metálicas.
- [8] García, S. K. (2007). Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometido a impacto.
- [9] González, V.; Barrios, A. y Molina, M. (2017). Proyectos de rehabilitación estructural. La sostenibilidad de los refuerzos con materiales compuestos. En Proceedings of International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions, (3),674-685
- [10] G. Pulido, M. Dolores (1998). Reparación y refuerzos con composites.
- [11] G. Pulido, M.D.; Sobrino, J.A. (2002). Hacia la aplicación de los materiales compuestos en el diseño de pasarelas. Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos. Editor CIMNE, Barcelona, pp. 547-576. ISBN: 84-95999-06-4.



- [12] Grace, N. F. (2003). Environmental/durability Evaluation of FRP Composite Strengthened Bridges.
- [13] Granda, L. A. (2016). Evaluación de las propiedades de materiales compuestos fabricados a partir de fibras semiquímicas de leucaena collinsii y polipropileno.
- [14] ISO 14040: 2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [15] Job, S.; Leeke, G.; Tarisai, P.; Oliveux, G.; Pickering, S. y Aizat, N. (2016). Composites recycling: where are we now? Consultado el 13 de abril de 2018 de <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf>
- [16] Lévy, É. (1992). Diccionario akal de física. Ediciones Akal.
- [17] Martínez, S. (2013). Comportamiento estructural de elementos de fábrica reforzados con materiales compuestos avanzados solicitados a flexión y flexocompresión.
- [18] Mastroviti, P. (2012). Estado actual del refuerzo mediante FRP de elementos, de sección rectangular, sometidos a compresión simple.
- [19] Moran J. P. (1990). Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams". Journal of Structural Engineering, ASCE, 116(4), 978-995.
- [20] Parra, C.; Martínez, E.; Valcuende, M. y Garrido, A. (2012). Análisis de métodos para evaluar el refuerzo a esfuerzo cortante con CFRP en vigas de hormigón armado.
- [21] Pérez, M. A. (2006). Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación.
- [22] Piñero, J. Á. (2016). Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución.
- [23] Rasheed, H. A. (2014). Strengthening design of reinforced concrete with FRP. CRC Press.



-
- [24] Sánchez, C., y Ruiz, J. M. (2017). Selección de un material compuesto de matriz polimérica para la construcción de puentes.